

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO CAPTADOR DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA DE  
BAJA POTENCIA A PARTIR DE VIBRACIONES**

**DANIEL ALEJANDRO CAMACHO CORDON**

CÓDIGO: 1111436

**JHONNATAN CAMILO RINCON GIL**

CÓDIGO: 1110487

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**BOGOTÁ, D.C.**

**2016**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO CAPTADOR DE ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA DE  
BAJA POTENCIA A PARTIR DE VIBRACIONES**

**DANIEL ALEJANDRO CAMACHO CORDON**

CÓDIGO: 1111436

**JHONNATAN CAMILO RINCON GIL**

CÓDIGO: 1110487

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO DE LA  
UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA**

**DIRECTOR:**

**ING. DAVID HERRERA**

Ingeniero en Control

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
BOGOTÁ, D.C.**

**2016**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

Una vez realizada la revisión metodológica y técnica del documento final de proyecto de grado, doy constancia de que el (los) estudiante (s) ha cumplido a cabalidad con los objetivos propuestos y se encuentra preparado para la defensa del mismo ante un jurado evaluador que considere idóneo el Comité de Investigaciones del Programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Piloto de Colombia.



---

Ing. DAVID HERRERA

Director del Proyecto

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Agradecemos en primera instancia a Dios por guiarnos por el camino del bien y la rectitud. A nuestros padres por apoyarnos en nuestro recorrido de formación personal y profesional, por aportar los recursos necesarios para salir adelante en nuestro pre grado de ingeniería.

Agradeciendo a la universidad Piloto de Colombia, a la facultad de ingeniería mecatrónica y a los muchos otros que nos brindaron su ayuda en las aulas y en los laboratorios para el desarrollo de este proyecto.

También queremos agradecer al ingeniero Alejandro Gamboa por su colaboración en el tiempo dentro de la institución. De la misma manera agradecemos al ingeniero David Herrera por darle la respecta continuidad, apoyo y finalización del proyecto.

Adicionalmente al conjunto de ingenieros que siempre estaban a disposición de ayudarnos dentro de su área de conocimiento. Finalmente, un agradecimiento muy especial a las personas que con sus empresas en áreas específicas nos facilitaron la realización de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>NOTA DE ACEPTACIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>4</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE ANEXOS .....</b>	<b>10</b>
<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>11</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	11
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
1.2.1 Descripción del problema.....	11
1.2.2 Formulación del problema.....	12
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	12
1.4 OBJETIVOS.....	14
1.4.1 Objetivo general.....	14
1.4.2 Objetivos específicos .....	14
1.4.3 Delimitación del proyecto .....	14
1.4.3.1 Alcances .....	14
1.4.3.2 Limitaciones .....	14
1.5 MARCO REFERENCIAL .....	15
1.5.1 Marco teórico.....	15
1.5.1.1 Conceptos de los campos magnéticos.....	15
1.5.1.2 Fuerza de Lorentz .....	15
1.5.1.3 Ley de Faraday .....	16
1.5.1.4 Tipos de imanes.....	17
1.5.1.4.1 Alnico.....	17
1.5.1.4.2 Moldeados por inyección .....	18
1.5.1.4.3 Flexibles.....	18
1.5.1.4.4 Cerámicos o Ferrita .....	18
1.5.1.4.5 Súper imanes.....	18
1.5.1.4.6 Tierras raras .....	18
1.5.1.5 Captación de energía.....	18
1.5.1.5.1 Energía electromagnética.....	18
1.5.1.5.2 Almacenamiento de energía.....	19
1.5.1.6 Software de diseño .....	19
1.5.1.6.1 Bond Graph .....	19
1.5.1.6.2 Modelica .....	20
1.5.1.6.3 VHDL .....	21
1.6 ESTADO DEL ARTE .....	22
1.6.1 Energías renovables .....	22
1.6.2 Captación de energía por vibraciones .....	23
1.6.3 Desarrollos en Modelica.....	30
1.7 DISEÑO METODOLÓGICO .....	31
1.7.1 Metodología Preliminar .....	31
1.7.2 Recursos .....	33
<b>2. DESARROLLO DE MODELOS MATEMÁTICOS.....</b>	<b>34</b>
2.1 INDUCCIÓN DE VOLTAJE Y SISTEMA ELÉCTRICO .....	35
2.2 SUBSISTEMA MECÁNICO .....	38
2.3 POTENCIAL ELÉCTRICO.....	39
2.4 COMPORTAMIENTO GENERAL .....	39
<b>3. METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO.....</b>	<b>42</b>
3.1 ANÁLISIS ESTRUCTURAL .....	43

3.2	SISTEMA MASA RESORTE .....	46
3.3	CIRCUITO ELÉCTRICO.....	50
<b>4.</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE MODÉLICA PARA EL DISEÑO DEL DISPOSITIVO .....</b>	<b>54</b>
4.1	CAPTACIÓN DE ENERGÍA .....	54
4.2	RECTIFICACIÓN Y REGULACIÓN DEL VOLTAJE.....	58
<b>5.</b>	<b>PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>64</b>
5.1	PRUEBAS DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA.....	64
5.2	RECTIFICACIÓN Y REGULACIÓN.....	69
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>73</b>
6.1	CONCLUSIONES.....	73
6.2	TRABAJOS FUTUROS.....	74
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXO A. PLANOS MECÁNICOS .....</b>	<b>80</b>
	<b>ANEXO B. PLANOS ELÉCTRICOS.....</b>	<b>84</b>

## LISTA DE TABLAS

---

	Pág.
<i>Tabla 1. Comparación de captadores de energía .....</i>	29
<i>Tabla 2. Variables eléctricas de los Prototipos .....</i>	56
<i>Tabla 3. Tabla de valores y propiedades de cobre fino.....</i>	43
<i>Tabla 4. Coeficientes de rozamiento.....</i>	47
<i>Tabla 5. Materiales de sistema masa resorte .....</i>	48
<i>Tabla 6. Referencias de reguladores.....</i>	52
<i>Tabla 7. Cuadro comparativo de las pruebas realizadas a los 3 dispositivos .....</i>	69
<i>Tabla 8. Voltajes de salida vs frecuencias de prototipo final.....</i>	72

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Generación de energía a 2020.....	12
Figura 2. Crecimiento de captación de energía para 2014.....	13
Figura 3. Campos magnéticos en la tierra y en un imán.....	15
Figura 4. Regla de la mano derecha. ....	16
Figura 5. Ley de inducción de Faraday. ....	17
Figura 6. Conversión circuito eléctrico en modelo Bond Graph. ....	20
Figura 7. Modelo circuito RC en modélica.....	21
Figura 8. Planta solar en Honduras.....	23
Figura 9. Comparación aceleración, voltaje y desplazamiento para sistema piezoeléctrico.....	24
Figura 10. Generador piezoeléctrico de baja potencia. ....	25
Figura 11. Dispositivo de captación de energía para uso común. ....	26
Figura 12. Captadores de energía. (A)Hiper-D, (B)Perpetuum. ....	29
Figura 13. Sistema de flujo de aire desarrollado en Modélica.....	30
Figura 14. Diagrama de flujo para desarrollo óptimo. ....	34
Figura 15. Diagrama de relación entre bobina e imán ....	36
Figura 16. Comportamiento de captador de energía como circuito eléctrico.....	37
Figura 17. Modelo de Sistema masa resorte .....	38
Figura 18. Diagrama de bloques.....	41
Figura 19. Campo magnético de imanes mostrado con limadura de hierro.....	42
Figura 20. Diseños estructurales modulares.....	44
Figura 21. Estructura no modular para la bobina.....	45
Figura 22. Segunda Estructura no modular .....	45
Figura 23. Sistema masa resorte con resorte de compresión .....	49
Figura 24. Sistema masa resorte con resorte de elongación .....	49
Figura 25. Sistema masa resorte final acoplado a los diferentes dispositivos.....	50
Figura 26. Circuito rectificación puente de diodos.....	50
Figura 27. Señal de voltaje rectificada.....	51
Figura 28. Circuito rectificador puente de diodos y regulador.....	52
Figura 29. Circuito rectificador con duplicador de voltaje y regulador.....	53
Figura 30. Prototipo final.....	53
Figura 31. Diagrama de bloques en Open Modélica.....	55
Figura 32. Comparación de voltaje prototipos 1 y 2.....	57
Figura 33. valor del voltaje para el dispositivo final Fuente: Propia del autor.....	57
Figura 34. Componentes eléctricos en Modélica. ....	58
Figura 35. Valor de voltaje para los dos capacitores .....	59
Figura 36. voltaje de entrada vs voltaje de salida .....	59
Figura 37. Circuito regulador de voltaje y formulas.....	60
Figura 38. Circuito y variables de salida: (A)circuito completo, (B)grafica de voltaje, (C) grafica de corriente.....	61
Figura 39. Voltaje Captación de energía vs voltaje de salida .....	62
Figura 40. Generador de vibraciones acoplado a dispositivos.....	64
Figura 41. Voltaje alterno primer dispositivo. (A)5Hz, (B)6Hz, (C)9Hz, (D)15Hz, (E)17Hz, (F)23Hz ..	65



<i>Figura 42. Voltaje Captación de energía para segundo prototipo. (A)5Hz, (B)6Hz, (C)9Hz, (D)15Hz, (E)17Hz, (F)23Hz.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 43. Voltaje Captación de energía para tercer prototipo. (A)5Hz, (B)6Hz, (C)9Hz, (D)15Hz, (E)17Hz, (F)23Hz.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 44. Voltaje Captación de energía manual para tercer prototipo. (A)5Hz, (B)6Hz, (C)9Hz, (D)15Hz, (E)17Hz, (F)23Hz.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 45. Rectificación primer prototipo .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 46. Rectificación para prototipo final con puente de diodos.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 47. Comparación de señal de voltaje Captación vs rectificación .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 48. Voltaje rizado .....</i>	<i>71</i>

**LISTA DE ANEXOS**

---

*ANEXO A. Planos mecánicos ..... 80*  
*ANEXO B. Planos eléctricos ..... 84*

## 1. GENERALIDADES

---

### 1.1 INTRODUCCIÓN

La demanda energética que se presenta en el mundo actual ha generado la necesidad de explorar y desarrollar fuentes energéticas alternativas con las cuales subsistimos actualmente<sup>1</sup>. El incremento continuo de tecnologías y la evolución de la sociedad traen como consecuencia un consumo energético de crecimiento constante<sup>2</sup>, por lo cual la investigación de nuevos sistemas energéticos se vuelve fundamental para la sostenibilidad a corto y mediano plazo.

Para la solución a esta problemática los desarrollos tecnológicos han intentado desesperadamente generar alternativas que abarquen tanto un rendimiento considerable como un cuidado respectivo al medio ambiente. Se ha optado por una diversificación de captación de energías a pequeña escala que permitan cumplir con demandas energéticas específicas, como sensores en ubicaciones remotas, indicadores de advertencias en zonas de difícil acceso, etc. Sin embargo, las energías limpias implementadas actualmente no cuentan con la suficiente eficacia para cubrir las necesidades del diario vivir, ya que se requiere un ambiente muy limitado para su correcto funcionamiento (condiciones climáticas, geográficas, económicas, etc.).

En América latina se genera el 7% de la electricidad mundial por medio de hidroelectricidad, energía solar, eólica y geotérmica. Sin embargo, los desarrollos actuales en el campo de energías limpias no han incursionado en un sistema que aproveche las vibraciones. Por lo cual, se ha seleccionado un tipo de energía alternativa proveniente de imanes con un diseño específico para captar energía, siendo un sistema autónomo, inalámbrico y económico<sup>3</sup>.

El desarrollo de este proyecto busca implementar la energía electromagnética como una opción importante a tener en cuenta para el diseño de sistemas que requieran baja potencia, y que permita el aprovechamiento de energía cinética, para este caso las vibraciones. Teniendo en cuenta las alternativas existentes en el mercado, se diseñarán prototipos para obtener un comportamiento similar, utilizando materiales de bajo costo.

### 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.2.1 Descripción del problema

Los métodos alternativos para la generación y conversión de energía que se manejan actualmente están cubriendo áreas donde se requiere una gran cantidad de potencia, como puede observarse en el proyecto *Tokaido Shinkansen*, un tren bala que funciona mediante levitación magnética mediante la aplicación de superconductores, viajando aproximadamente a 270 km/h y recorriendo

---

<sup>1</sup> SANCHEZ GERMAN, Desarrollo y medio ambiente: una mirada a Colombia, (2002), citado 12 en diciembre de 2015.

<sup>2</sup> CASTRO MIGUEL, CEDA, Hacia una matriz energética diversificada en Ecuador, (2011), citado 08 en diciembre de 2015

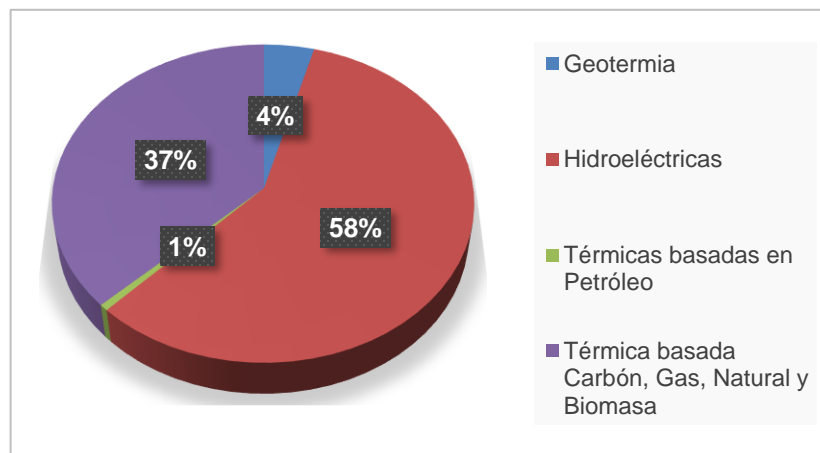
<sup>3</sup> WWF, Líderes en energía limpia Países top en energía renovable en Latinoamérica WWF, (2014), citado 05 en diciembre de 2015

la línea Tokyo - Osaka en 150 minutos<sup>4</sup>. También se están haciendo investigaciones para aplicar energía magnética en proyectos espaciales, utilizando un sistema de lanzamiento asistido mediante levitación magnética<sup>5</sup>.

Además, existen limitadas maneras para tener acceso a este tipo de tecnología. Colombia aún tiene pocas posibilidades frente a este tipo de adquisición de energía debido a que es un país con gran cantidad de recursos fósiles. Mediante el decreto 2143 el gobierno quiere incentivar a las diferentes empresas a que inviertan en energías alternativas y renovables donde pueden adquirir beneficios económicos frente a dicha inversión<sup>6</sup>.

Adicionalmente, la vibración y los sistemas magnéticos no han sido considerados como parte de un sistema óptimo para la recolección de energía. Como se puede ver en la figura 1 las proyecciones a futuro tienden a enfocarse en alternativas como la biomasa e hidroeléctricas.

*Figura 1. Generación de energía a 2020.*



*Fuente: ANACAFÉ. Hidrogeneración. URL*

*[https://www.anacafe.org/glifos/index.php/05ENER:Energia\\_hidrogeneracion#](https://www.anacafe.org/glifos/index.php/05ENER:Energia_hidrogeneracion#)*

### **1.2.2 Formulación del problema**

¿Cómo diseñar un sistema de baja potencia con suficiente efectividad que permita su aplicación e inclusión dentro de los diversos mercados energéticos y así mismo su implementación en los sistemas donde éste tipo de energía sea efectivo?

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

El desarrollo tecnológico del mundo actual ha generado una gran demanda energética y por ende la búsqueda de nuevas alternativas para la generación y captación de esta. En el sector industrial, el

---

<sup>4</sup> CENTRO POLITECNICO SUPERIOR, El tren de levitación magnética, ,2002, citado 06 en diciembre de 2015

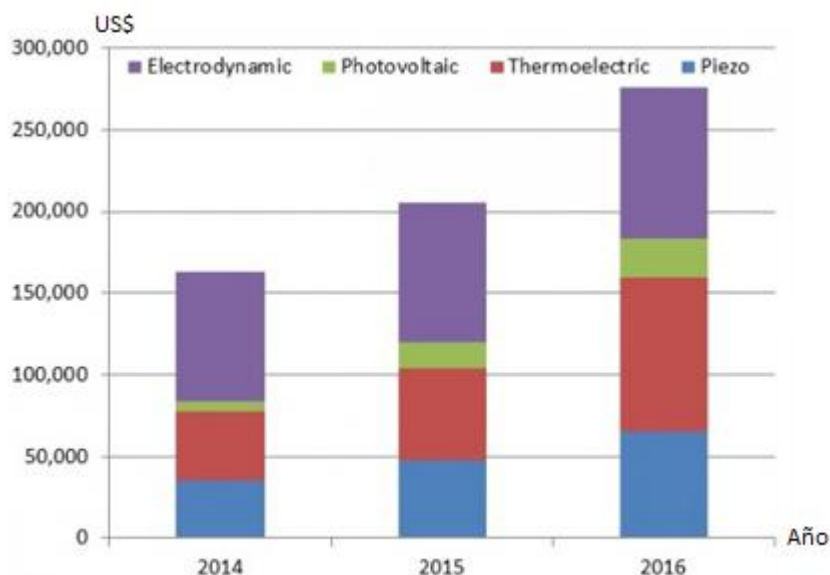
<sup>5</sup> UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CARTAGENA, Proyecto fin de carrera control de maqueta de levitación magnética utilizando un microcontrolador, David Cazorla Martínez, 2011, Citado 04 en diciembre de 2015

<sup>6</sup> MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, Decreto número 2143, 2015, citado 27 en noviembre de 2015

crecimiento de sistemas que permitan la evaluación constante de los procesos específicos ha generado la necesidad de implementar fuentes de energía propios a sensores inalámbricos y elementos de control para el continuo y correcto funcionamiento de estos. Es por esta razón que la captación de energía de baja potencia ha influenciado el mercado energético actual, principalmente porque el 90% de la totalidad del costo de un dispositivo está en el cableado.<sup>7</sup>

Adicionalmente, el crecimiento de estas tecnologías ha llevado a que empresas como BMW, desarrolle tecnologías de energía para alimentar sus vehículos eléctricos. La NASA maneja sus vehículos planetarios con energía termoeléctrica, y los recolectores piezoeléctricos han permitido alimentar múltiples sensores remotos en la actualidad<sup>8</sup>. La figura 2 muestra el crecimiento de estas tecnologías de captación de energía presupuestadas para 2024, donde se tiene la idea de que, para este año, el mercado de captación de energía supere los US\$ 2600 millones.

*Figura 2. Crecimiento de captación de energía para 2014*



*Fuente: EUROPEAN EDITORS. Nuevas tecnologías para recolección de energía. URL <http://www.digikey.com/es/articles/techzone/2014/jul/new-energy-harvesting-technologies>*

En Colombia el desarrollo de tecnologías energéticas está arraigado a la importación de elementos que le permitan utilizar nuevas formas de energía sin incurrir en gran escala en la investigación.

Este proyecto busca incurrir en la energía electromagnética, un tipo de energía alternativo a los convencionales (solar, hidráulica, eólica, geotérmica, entre otras), aprovechando los fenómenos

<sup>7</sup> NENNINGER Phillip, ULRICH, Marco. Tiempo de recolección, La captación de energía para la creación de dispositivos realmente autónomos en procesos industriales. ABB, pag 47. Citado en 04 de diciembre de 2016

<sup>8</sup> EUROPEAN EDITORS. Nuevas tecnologías para recolección de energía. 2014. Citado en 04 de diciembre de 2016

físicos de los imanes y así generar energía de baja potencia que puede ser aprovechada sin depender de factores ambientales.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 *Objetivo general***

Diseñar y construir un dispositivo que genere energía a partir de campos magnéticos mediante movimientos vibratorios para ser utilizados en sistemas de baja potencia.

### **1.4.2 *Objetivos específicos***

- Determinar los modelos matemáticos aplicables a la captación de energía a partir de campos electromagnéticos.
- Construir el prototipo de uno de los diseños propuestos.
- Analizar y seleccionar estrategias computacionales para el diseño y simulación de dispositivos para la captación de energía por medio de campos magnéticos.
- Realizar estudios del comportamiento del dispositivo mediante pruebas computacionales y mecánicas sobre una plataforma vibratoria.

### **1.4.3 *Delimitación del proyecto***

#### **1.4.3.1 Alcances**

Obtener un modelo computacional mediante el software libre OPENMODELICA, que permita simular los diferentes comportamientos de los prototipos diseñados, a partir de las variables descritas en el modelo matemático.

Diseñar y construir un sistema mecánico que permita la generación de energía continua a partir del campo magnético del imán, y posteriormente inducirlo en una bobina.

Acondicionar el voltaje variable obtenido en el captador de energía, para ser usado como fuente D.C, en dispositivos de bajas frecuencias.

Construir un prototipo captador de energía que incluya un sistema de regulación y rectificación de bajo costo, utilizando materiales con coeficientes magnéticos mínimos.

#### **1.4.3.2 Limitaciones**

En el sistema masa resorte, el rozamiento entre los elementos afecta el movimiento del imán a través de la bobina, por lo que reduce el voltaje de salida del captador.

La corriente generada por el dispositivo tendrá valores mínimos, por lo que no se puede comprobar la funcionalidad del prototipo en componentes electrónicos convencionales, como tarjetas de programación, motores, etc.

Los condensadores que se utilizan para el almacenamiento de energía generada con estos captadores, deben tener un alto valor de capacitancia, en su defecto deben ser supercapacitores, pero tienen un alto costo, al igual que los materiales implementados para estos captadores de energía.

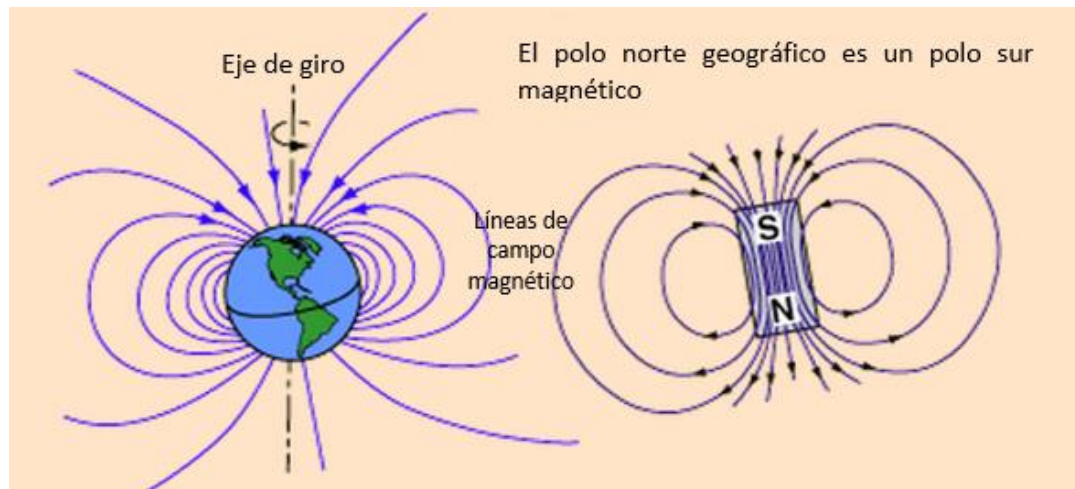
## 1.5 MARCO REFERENCIAL

### 1.5.1 Marco teórico

#### 1.5.1.1 Conceptos de los campos magnéticos

Los campos magnéticos se crean por un flujo de carga (corrientes eléctricas), que tienen una bipolaridad constante, es decir, no es posible aislar sus polos. Los campos magnéticos envuelven las corrientes eléctricas generando círculos o vectores en todas direcciones, pero siempre alrededor de la corriente eléctrica, como pasa en el planeta tierra<sup>9</sup>, mostrado en la figura 3. La fuerza de Lorentz describe matemáticamente la potencia que generan estas fuentes magnéticas.

*Figura 3. Campos magnéticos en la tierra y en un imán.*



Fuente: HYPERPHYSICS, Conceptos sobre campo magnético: campo magnético. URL <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/magfie.html#c1>

#### 1.5.1.2 Fuerza de Lorentz

Esta ley determina la dirección de la corriente inducida en una espira producida por su flujo magnético. Para que esto se pueda determinar, la espira conductora debe estar cerrada y mantener un flujo magnético externo que cambie a través del tiempo.

Teniendo un sistema donde un imán se mueve al interior de una bobina, el flujo variable produce una f.e.m que genera una corriente inducida. Al disminuir la distancia entre la bobina y el imán, se

---

<sup>9</sup> HYPERPHYSICS, Conceptos sobre campo magnético: campo magnético, HYPERPHYSICS, noviembre 15, (2009), citado 28 en mayo de 2015

produce un campo magnético con dirección hacia el interior de la bobina, obteniendo un aumento del flujo magnético. De igual manera cuando la distancia entre el imán y la bobina se aumenta el flujo disminuye y produce un campo magnético en dirección opuesta, como se observa en la figura 4.

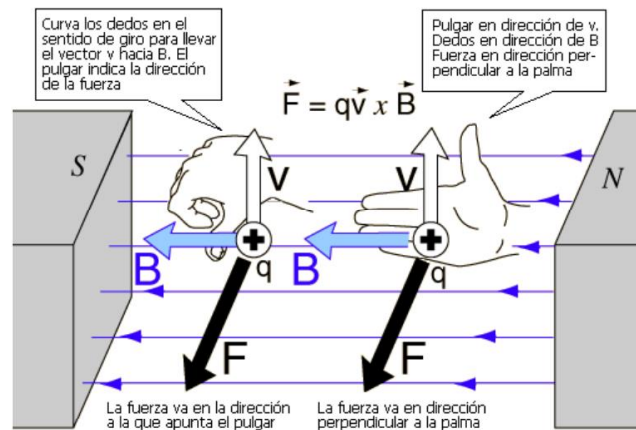
La fuerza principal del electromagnetismo está dada por la siguiente ecuación

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.1)$$

Donde demuestra la fuerza eléctrica en una carga puntual

Siendo  $\vec{v}$  = velocidad,  $\vec{B}$  = campo magnético y  $q$  = carga eléctrica donde  $\vec{F}$  siempre será perpendicular y proporcional a  $\vec{v}, \vec{B}$  siguiendo la regla de la mano derecha<sup>10</sup>.

Figura 4. Regla de la mano derecha.



Fuente: C.I.P ETI TUDELA electrotecnia por ordenador. Capítulo 3 Magnetismo.

### 1.5.1.3 Ley de Faraday

Es una de los teoremas básicos de electromagnetismo. Se establece que la fuerza electromotriz (f.e.m) inducida surge a partir de la corriente inducida por el movimiento que genera un imán. Según la ley de Faraday la f.e.m inducida es igual al cambio de flujo a través de una bobina. Se define mediante la siguiente ecuación

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1.2)$$

<sup>10</sup> C.I.P ETI Tudela, Electrotecnia por ordenador: Magnetismo, 2005, citado 3 en junio de 2015

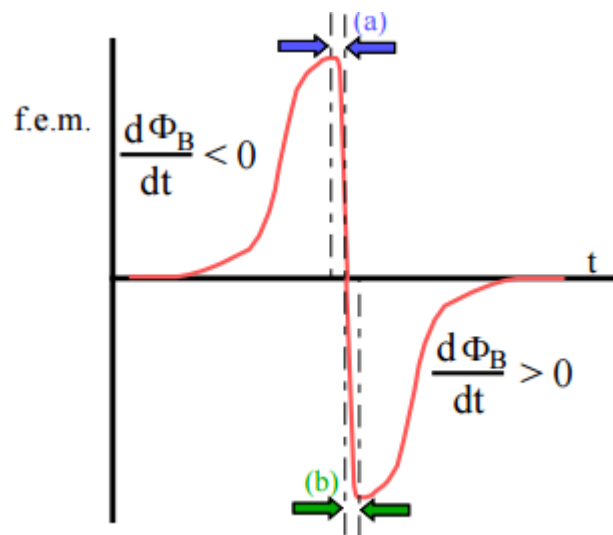


Donde  $\Phi_B$  es el flujo magnético que atraviesa el área de la bobina, siendo el signo negativo el sentido del flujo magnético (f.e.m inducida).<sup>11</sup>

Para una bobina con N cantidad de espiras, el flujo se determina mediante la suma de la f.e.m inducida en cada espira, determinado mediante la siguiente ecuación

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d(N\Phi_B)}{dt} \quad (1.3)$$

Figura 5. Ley de inducción de Faraday.



Fuente: RESNICK Robert, HALLIDAY David. Física II, La ley de inducción de Faraday, pág. 226,227.

#### 1.5.1.4 Tipos de imanes

Los imanes pueden ser de tipo natural donde el elemento ya contiene óxido de hierro o puede ser de tipo artificial gracias a diferentes aleaciones, cabe resaltar que existen también imanes que tienen sus propiedades por poco tiempo o como la magnetita que nunca pierden sus propiedades magnéticas<sup>12</sup>.

##### 1.5.1.4.1 Alnico

Como su nombre lo indica son compuestos que están formados de AL (aluminio)-Ni (níquel)-Co (cobalto), son de bajo precio, tiene alto nivel de desmagnetización (coercitividad)<sup>13</sup>.

<sup>11</sup> RESNICK Robert, HALLIDAY David, Física II, pág. 226,227, la ley de inducción de Faraday, 1983, citado 3 en junio de 2015

<sup>12</sup> UNIVERSIDAD DE CALDAS, U. D. F. J. 'Diseño y fabricación de un prototipo de un moto-generator magnético',2012, citado 03 en junio de 2015

<sup>13</sup> Mayores BHMAY, QUESADA Adrián, Difusión: El reto de los imanes permanentes', 2011, citado 05 en junio de 2015

#### **1.5.1.4.2 Moldeados por inyección**

Sus propiedades tienden a ser como los componentes plásticos, están hechos a base de resina o a base de polvos de metal por descomposición térmica<sup>14</sup>.

#### **1.5.1.4.3 Flexibles**

Este tipo de imanes tiene un campo magnético muy pequeño, donde sus compuestos principales son el caucho, PVC u otros materiales que le permitan la flexibilidad por medio de la acumulación de partículas de hierro y estroncio (partículas magnéticas)<sup>15</sup>.

#### **1.5.1.4.4 Cerámicos o Ferrita**

Son imanes permanentes de gran uso en el mercado el magnetismo de estos imanes “se debe a los iones Fe(III)”<sup>16</sup> además su estructura permite fabricarlos de varias formas, aunque son muy frágiles.

#### **1.5.1.4.5 Súper imanes**

Fabricado con aleaciones metálicas que hacen que se comporten como superconductores esto ayudaría a varios tipos de tecnología para tener mejores resultados<sup>17</sup>.

#### **1.5.1.4.6 Tierras raras**

Son imanes compuestos de hierro, boro, neodimio, su oxidación es rápida, “las tierras raras poseen propiedades magnéticas excepcionales...la mayoría de las tierras raras superan a los elementos clásicos como hierro, cobalto y níquel”<sup>18</sup> además son económicos, fáciles de encontrar y sus propiedades permiten magnetizar o desmagnetizar otros imanes.

### **1.5.1.5 Captación de energía**

#### **1.5.1.5.1 Energía electromagnética**

Debido a los fenómenos físicos generados por ese tipo de energía se deben tener en cuenta ciertos aspectos que definen el correcto funcionamiento del sistema, el concepto más importante es la compatibilidad electromagnética que estudia tanto la generación captación y propagación. Además, ya es fundamental que todos los equipos contengan protección contra este fenómeno. Este fenómeno tiene cambios en la transferencia de energía por medio de radiación<sup>19</sup>.

---

<sup>14</sup> Principales Operaciones, en la and Metalurgia de Polvos, ‘Diferentes Aspectos de La Metalurgia de Los Polvos’,2009, citado 25 en mayo de 2015

<sup>15</sup> MURILLO Rubén Darío, CASTRO Jesús Fernando, Facultad de ciencias, Construcción de una maqueta: didáctica de un sistema posicionador de órdenes para un buque, 2006, citado 25 en mayo de 2015

<sup>16</sup> DUFOUR and others, ‘Procesos de Obtención de Ferritas Hexagonales Tipo M’, Revista de Metalurgia, 31 (1995), 111–19. p. 2-116, citado 10 en julio de 2015

<sup>17</sup> LORENTE Gabriel, un espectador del progreso científico: super imanes, UNED ediciones,2005, citado 10 en julio de 2015

<sup>18</sup> PORCHER, P., et al. Tierras raras: materiales avanzados. En *Anales de la Real Sociedad Española de Química*. Real Sociedad Española de Química, 2000. p. 11-26, citado 28 en mayo de 2015

<sup>19</sup> SOLBES, Tarín, (1998). Algunas dificultades en torno a la conservación de la energía. In *Enseñanza de las Ciencias*,1998, citado, 28 en mayo de 2015

#### 1.5.1.5.2 Almacenamiento de energía

Gracias a los superconductores tenemos pequeñas pérdidas en el almacenamiento de energía, para ponerla de nuevo en circulación solo basta con descargar unas bobinas, existe un tipo de almacenamiento como es el SMES (almacenamiento de energía en superconductores magnéticos) que también tiene la propiedad de inversor y rectificador "El inversor/rectificador presenta pérdidas de energía cercanas al 2-3% en cada dirección. Los SMES presentan menores pérdidas de electricidad en comparación a otros métodos de almacenamiento de energía."<sup>20</sup>

Hay que tener en cuenta las bobinas y el mecanismo de enfriamiento para este tipo de sistemas, la bobina cuenta con cero resistencias al flujo de corriente eléctrica con cambios relacionados a su temperatura y densidad de flujo, por lo general contienen aleaciones de Niobio-titanio, utilizando helio dentro del sistema de refrigeración compuesto por el refrigerador y por el contenedor criogénico donde está ubicada la bobina. Se elimina la mayor cantidad de calor y se asegura que no supere la temperatura crítica estipulada por la bobina<sup>21</sup>.

#### 1.5.1.6 Software de diseño

##### 1.5.1.6.1 Bond Graph

Es una herramienta que permite desarrollar análisis de sistemas. Su objetivo principal es la representación de cualquier sistema ingenieril que estén ligados a sistemas de energía relacionados con mecanismos de intercambio de energía, subsistemas, mecanismos de disipación o almacenamiento. Este programa da la posibilidad de estructurar subsistemas con la posibilidad de unirlos a un sistema global.

Este lenguaje provee el análisis de sistemas de manera sistemática, estructurada orientada a objetos, que busca sintetizar los diagramas clásicos de circuitos y sistemas mecánicos en modelos simples a partir de líneas de flujo<sup>22</sup>.

La característica principal que ofrece Bond-Graph es permitir al usuario modelar sistemas y dividirlos en subsistemas independientes, con el fin de generar análisis más completos dentro del sistema global. De esta manera, la estructura de cualquier sistema permite evaluarse de manera simple, otorgando a este lenguaje una mayor optimización de sus funciones de tratamiento de los sistemas y generar un resumen de análisis más completo en el ensamble final.

El Elemento fundamental de este lenguaje que representa entre muchas aplicaciones, el flujo de potencia entre sistemas, subsistemas y elementos es una línea o "bond". Estas representaciones graficas muestran la dirección del flujo de un tipo de energía o de su transmisión y se indica por la media flecha que aparece en uno de los extremos del "bond". En la figura 6 se muestra un claro

---

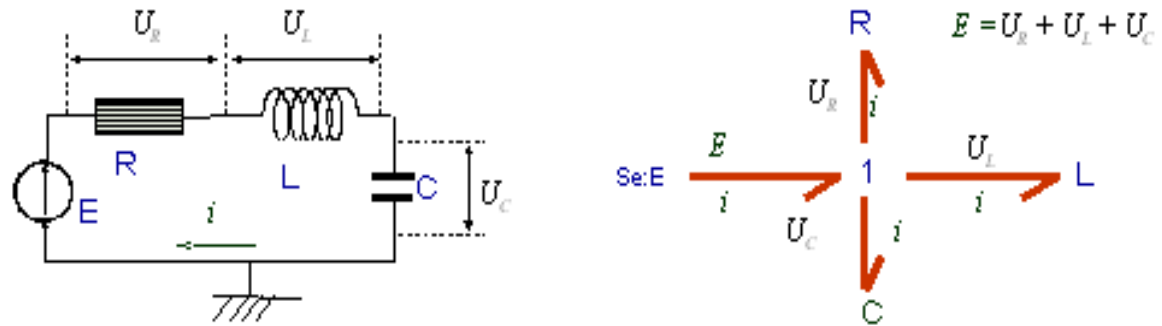
<sup>20</sup>VALDOVINOS Fredy, OTALORA ROBERTO, 'Almacenamiento de Energía: Desarrollos Tecnológicos Y Costos', 2008, 17., citado 30 en mayo de 2015

<sup>21</sup> GONZ Guadalupe, 'almacenamiento de energía magnética por superconducción', 2013, citado 18 en agosto de 2015

<sup>22</sup> UNIVERSIDAD DE MALAGA, departamento de ingeniería de sistemas y automática. Introducción a la modelización con Bond Graphs, 2012, citado 26 en agosto de 2015

ejemplo de este lenguaje, donde se convierte un circuito eléctrico básico en una representación Bond Graph. La flecha al final del “bond” indica la dirección de la corriente<sup>23</sup>.

Figura 6. Conversión circuito eléctrico en modelo Bond Graph.



Fuente: INSIA, Introducción a la técnica de Bond Graph en la dinámica ferroviaria.

#### 1.5.1.6.2 Modelica

Modelica es un lenguaje orientado a objetos para modelar sistemas físicos. Desde el punto de vista del usuario, los modelos están descritos mediante planos, conocidos también como diagramas de objetos<sup>24</sup>. A diferencia de otros lenguajes orientados a objetos, Modelica permite describir la constitución de cada componente en un modelo y su estructura frente al sistema en general.

Este lenguaje permite definir todas las partes de un modelo que pueden ser estructuradas dentro de paquetes de información, los cuales tienen como finalidad generar un completo ambiente de simulación para poder obtener todos los análisis posibles. Básicamente, el software está estructurado a partir de ecuaciones diferenciales, algebraicas y discretas<sup>25</sup>. Sin embargo, es necesario simplificar los procesos de diseño mediante el uso de librerías, cuando se presentan modelos de simulación repetitivos, lo que permite un desarrollo ágil en los métodos de evaluación. Para esto, el lenguaje cuenta con una librería estándar de crecimiento constante llamado “Package Modelica”, donde los usuarios pueden almacenar y generar sus propias librerías y compartirlas de manera global.

Dentro de los componentes fundamentales dentro de este lenguaje se destacan las clases, que cuentan con una serie de reglas descritas para poder trabajar dentro cualquier sitio de la estructura

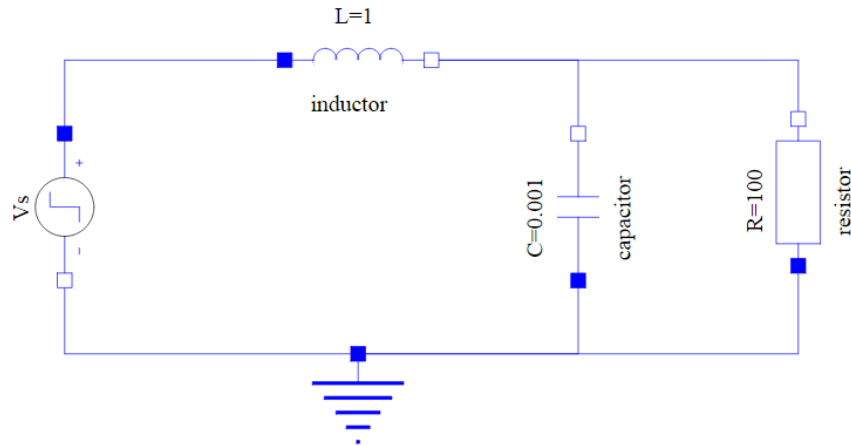
<sup>23</sup> INSIA, Introducción a la técnica de bond graph en la dinámica ferroviaria ,2011, citado 05 en septiembre de 2015

<sup>24</sup> MODELICA. lenguaje de modelamientos de sistemas, lenguaje de especificación versión 3.3 revisión 1,2014, citado 20 en agosto de 2015

<sup>25</sup> LABORATORIO DE SISTEMAS DINAMICOS, facultad de ciencias exactas, ingeniería y agrimensura, universidad nacional de rosario, introducción a modelica,2014, citado 20 en agosto de 2015

del modelo, como se observa en el circuito RLC en la figura 7. Otro aspecto importante es el plano de modélica como tal, que facilita principalmente las transformaciones de sistemas y modelos a partir de diversos sistemas de ecuaciones<sup>26</sup>.

*Figura 7. Modelo circuito RC en modélica.*



*Fuente: TILLER. Modélica by example, Componentes: componentes eléctricos. URL [http://book.xogeny.com/components/components/elec\\_comps/](http://book.xogeny.com/components/components/elec_comps/)*

### 1.5.1.6.3 VHDL

Este tipo de lenguaje modela sistemas digitales de circuitos eléctricos donde es posible simular y crear el circuito, es un sistema sencillo de programar cuenta con variedad de herramientas, y se programa puede programar desde el hardware, es basado en un estándar de programación que le permite minimizar errores y problemas de compatibilidad.

VHDL es un lenguaje que contiene una gran cantidad de herramientas y un sistema de sintaxis muy flexible para el modelado de comportamiento de datos, funcionamientos de hardware y modelado estructural. VHDL permite el modelado detallado y compacto, con diversas maneras de análisis, del comportamiento de un sistema conocido. Mediante este lenguaje obtener un modelo de un sistema, eléctrico o físico, ya implementado, para interactuar con su comportamiento y adaptarlo a las condiciones requeridas.

Este lenguaje permite dos descripciones fundamentales de los sistemas:

---

<sup>26</sup> MODELICA by example, Componentes: componentes eléctricos, Modelica by example, noviembre 15, (2009), citado 05 en septiembre de 2015

Estructura: VHDL es utilizado al igual que los demás lenguajes orientados a objetos, donde simplemente se especifican unos componentes, por un lado, y por otro lado sus relaciones y conexiones.

Comportamiento: VHDL permite definir la descripción de sistemas y circuitos sin necesidad de conocer su estructura interna. A diferencia de otros lenguajes, la simulación se puede generar teniendo en cuenta las características básicas, como su comportamiento final y los elementos base que corresponden a la estructura del sistema.

Para la descripción de hardware, algunas ventajas que tiene este lenguaje son:

- Los circuitos que se implementan mediante VHDL, pueden ser utilizados como diseño de guías de otras simulaciones cuando se generan por medio de herramientas que sinteticen estos modelos.
- VHDL permite un estudio completo de un sistema desde su parte más básica hasta el nivel de desarrollo completo, estructurando un sistema de compuertas que permitan garantizar el análisis completo del proyecto<sup>27</sup>.

## **1.6 ESTADO DEL ARTE**

### **1.6.1 Energías renovables**

Desde el comienzo de siglo se han estudiado a profundidad diversos métodos que proporcionen alternativas para la demanda energética mundial. Una opción práctica ha sido el uso de energías renovables, definidas como energías que puedan regenerarse con facilidad sin afectar el medio ambiente<sup>28</sup>. Hay que tener en cuenta que actualmente solo el 19% del consumo energético mundial es producido por energías renovables<sup>29</sup>. Sin embargo, el uso de estas energías ha permitido el crecimiento laboral en diversos sectores de la industria<sup>30</sup>.

En Latinoamérica, los últimos dos años se ha invertido alrededor de US\$12400 en sistemas de energías renovables, buscando beneficiarse de las ventajas que estas ofrecen como la generación de empleo, el tiempo de implementación y mejorar las condiciones ambientales para evitar cambios climáticos abruptos<sup>31</sup>. Entre los proyectos más importantes en el mundo y el más grande en Latinoamérica, es el parque solar de honduras, con 80500 paneles solares y una producción

---

<sup>27</sup> UNIVERSIDAD DE VALENCIA, VHDL Lenguaje para descripción y modelado de circuitos, Fernando Pardo, 1997, citado 25 en agosto de 2015

<sup>28</sup> INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS, S.A., Energías renovables y eficiencia energética, Schanllenberg et al, 2008, citado en noviembre de 2015

<sup>29</sup> UPME, Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia, ministerio de minas y energía, 2015, citado en noviembre de 2015

<sup>30</sup> FEDERACIÓN DE LA ENERGÍA DE LA COMUNIDAD DE MADRID, Energías renovables, Luis merino, 2012, citado en noviembre de 2015

<sup>31</sup> URGENTE24.COM, ¿Quién mueve US\$7.600 millones al año en Latinoamérica 2016?, 2016, citado en marzo 2016

aproximada de 145 megavatios, mostrado en la figura 8. El parque eólico de Jepirachi, ubicado en la Guajira, es un importante proyecto de la región ya que produce alrededor de 19,5 MW<sup>32</sup>.

*Figura 8. Planta solar en Honduras.*



*Fuente: SANDOVAL. CNN, La planta solar más grande de Latinoamérica está en Honduras. URL <http://cnnespanol.cnn.com/2015/05/18/la-planta-solar-mas-grande-de-latinoamerica-esta-en-honduras/>*

Buscando implementar sistemas de control para energías alternativas, la importancia del modelamiento matemático se ve reflejada en proyectos como sistemas de almacenamiento para la producción de energía solar. Al producir energía térmica, se tienen en cuenta factores externos como perturbaciones que permiten evaluar la estrategia que determine la optimización de almacenamiento y correcta operación. Dados los costos base que pueden requerir estos sistemas, hay que hacer énfasis en la cantidad de energía que se quiere almacenar, debido a que determinará la competitividad del producto frente a los sistemas actuales. El objetivo principal es alimentar un sistema que pueda cumplir con su funcionamiento sin depender de la cantidad de energía captada, sino de la energía que está almacenada y que es utilizable en todo el tiempo de funcionamiento<sup>33</sup>.

### **1.6.2 Captación de energía por vibraciones**

En las áreas industriales de Rajshahi, Bangladesh, se hicieron estudios para determinar las ventajas sobre el uso de energías alternativas mediante captación de energía. Hubo un análisis a partir de las vibraciones producidas en la maquinaria del sector, donde se generaban altos niveles de vibración que excitaban un sistema de elementos piezoeléctricos, para luego ser convertida la energía y almacenada con el fin de alimentar los procesos industriales de este sector. La figura 9 muestra los resultados obtenidos en la vibración de un motor diésel donde se realizaron la medición de voltaje

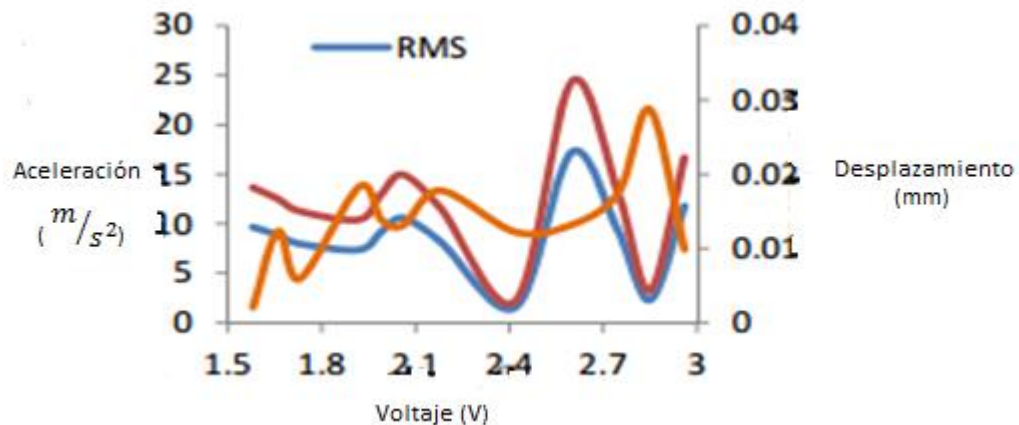
---

<sup>32</sup> CNN, La planta solar más grande de Latinoamérica está en Honduras, Elvln Sandoval, 2015, citado 18 en junio de 2015

<sup>33</sup> ZAVERSKY, RODRÍGUEZ-GARCÍA, et al, Transient Behavior of an Active Indirect Two-tank Thermal Energy Storage System During Changes in Operating Mode – An Application of an Experimentally Validated Numerical Model *Energy Procedia*, 2014, citado 20 en junio de 2015

en base a la aceleración y la velocidad de este. La idea es poder generar su propia energía para pequeños sistemas de sensores que necesiten bajos niveles de potencia, mientras que están activas las maquinas en el área<sup>34</sup>.

*Figura 9. Comparación aceleración, voltaje y desplazamiento para sistema piezoeléctrico.*



*Fuente: LIU, QUAN, et al. Voladizo piezoeléctrico basado en MEMS con lamina PZT para captación de energía a partir de vibraciones de baja frecuencia.*

La visión del mundo se ha centrado en la búsqueda de este tipo de soluciones alternativas para el continuo desarrollo de la infraestructura energética. Sin embargo, estos sistemas no se encuentran acreditados como una solución en la actualidad. Hay entidades que buscan demostrar la importancia de estos sistemas ya que cuentan con una gran cantidad de ventajas, una de ellas, quizás la más importante, es el bajo costo de producción de estos dispositivos<sup>35</sup>.

Dentro de los sistemas de recolección de energía, se han implementado dispositivos que permiten una captación de energía con sistemas de baja frecuencia, a partir de elementos piezoeléctricos, donde se busca optimizar esta captación evaluando su respectiva conexión, en serie o en paralelo. Sin embargo, basados en los resultados de simulación y experimentales se llega a la conclusión que, en ambas configuraciones, se puede llegar a la misma potencia, variando las impedancias, ya que en paralelo no es necesario impedancias de un valor alto para llegar al nivel de potencia deseada, dejando esta configuración muy práctica para desarrollos físicos<sup>36</sup>.

La aplicación de sistemas mediante elementos piezoeléctricos ha sido un tema que se ha tratado en las últimas décadas, donde el análisis de estas piezas, tanto individualmente como en configuraciones en conjunto, han determinado que pueden ser excitadas mediante vibraciones,

<sup>34</sup> RAHMAN and HOQUE, prospectos de captación de energía a partir de vibraciones en Bangladesh, *Procedia Eng*,2014, citado 25 en junio de 2015.

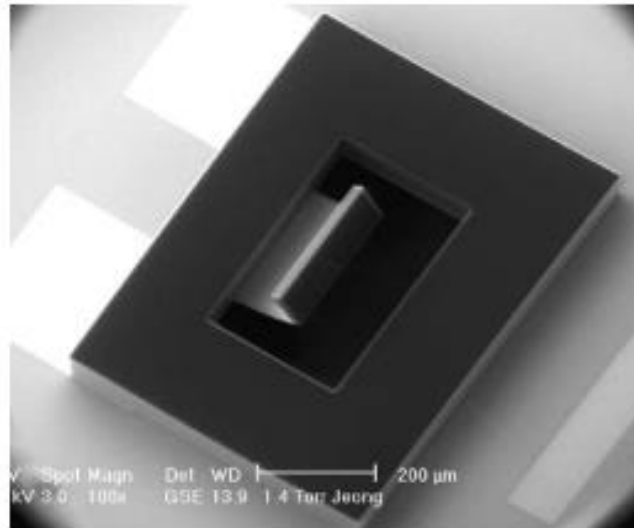
<sup>35</sup> BOISSEAU, DESPESE, and SEDDIK, Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting, *Small-Scale Energy Harvest*,2012, citado 20 en junio de 2015.

<sup>36</sup> LIU, QUAN, et al, A MEMS-based piezoelectric cantilever patterned with PZT thin film array for harvesting energy from low frequency vibrations, *Phys. Procedia*,2011, citado 29 en junio de 2015



donde el modelo matemático genera una estimación frente al nivel de efectividad en captación de energía<sup>37</sup>. En la figura 10 se muestra un prototipo de un generador piezoeléctrico de baja potencia (PMPG por sus siglas en inglés), a partir del análisis de materiales que optimizaron la captación de energía, mostrando una película delgada de un zirconato titanato de plomo ( $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ ), más conocido como PZT. Se realizaron experimentos con frecuencias aproximadas a 14 kHz, resultando una potencia de salida de 1 uW, para un captador con dimensiones de 170  $\mu\text{m}$  x 260  $\mu\text{m}$ <sup>38</sup>.

*Figura 10. Generador piezoeléctrico de baja potencia.*



*Fuente: ELSEVIER. Generador de poder con lamina PZT delgada.*

Adicionalmente se presentan los estudios de simulación de estructura de vigas piezoeléctricas individuales y en forma de peine para la captación de energía. Las derivaciones de las ecuaciones matemáticas se basan en la teoría de Euler-Bernoulli para el análisis de la deformación en vigas, ya que estos elementos piezoeléctricos se deformarán a medida que son afectados por vibraciones. Se toma también un par de vigas que están interactuando entre sí, para obtener un sistema de vibración a partir de impactos, el cual tiene como principal ventaja el convertir bajas frecuencias en altas frecuencias. Teniendo en cuenta el grosor de dichas vigas, y sabiendo que es un sistema no lineal, se ha determinado que produce mayores cantidades de energía que en un sistema lineal. La rigidez del material y, el espesor son los factores que afectan la cantidad de energía producida dentro del sistema, ya que está muy relacionado dentro de la modelación matemática a la distancia entre las vigas y al espesor de cada una de ellas. Se ha determinado que usando vigas de diferentes dimensiones producen ciertos picos de carácter aleatorio de energía y variando la frecuencia de

---

<sup>37</sup> DIYANA, MUTHALIF, et al, Vibration Energy Harvesting using Single and Comb-shaped Piezoelectric Beam Structures: Modeling and Simulation *Procedia Eng*,2012, citado 20 en junio de 2015

<sup>38</sup> ELSEVIER, MEMS generador de poder con lamina PZT delgada, Y.B:Jeon et al,2004,citado en junio de 2015

vibración para cada viga, producirá una mayor cantidad de energía que si el sistema fuera totalmente lineal<sup>39</sup>.

La búsqueda de optimizar estos sistemas que realicen la obtención de energías a partir de los elementos piezoeléctricos, ha permitido el desarrollo de prototipos que funcionen a bajas frecuencias. Se tiene por ejemplo una especie de bola de conducción, que permite reducir el tamaño del conversor, que, a diferencia de los sistemas convencionales, es sensible tanto a las vibraciones como a las rotaciones e inclinaciones, mostrado en la figura 11, donde se hizo la aplicación en el movimiento humano. Al ser un sistema triaxial se puede adaptar fácilmente a una aplicación donde el movimiento humano sea la base para la captación de energía<sup>40</sup>.

*Figura 11. Dispositivo de captación de energía para uso común.*



*Fuente: ALGHISI, DALOLA, and FERRARI, "Conversor piezoeléctrico "Ball-impact" con múltiples grados de libertad para captación de energía de vibraciones de bajas frecuencias en sensores autónomos*

Otra búsqueda o uso que dio resultado fue la fabricación e implementación de microsistemas de generación de energía a partir de piezoeléctricos ha mostrado resultados aceptables para el objetivo propuesto. Con prototipos con dimensiones menores a 2 mm, se han llegado a producir 2 mW, teniendo en cuenta como aspecto fundamental la variación de la flexibilidad en el material, ya que la frecuencia natural del sistema varía respecto a esta propiedad, aumentando el potencial de sus aplicaciones. A futuro se pretende generar circuitos tipo integrado donde se pueda tanto captar la

---

<sup>39</sup> VIJAYAN, FRISWELL, HADDAD Khodaparast, and ADHIKARI. Non-linear energy harvesting from coupled impacting beams *Int. J. Mech*, 2015, citado 20 en junio de 2015

<sup>40</sup> ALGHISI, DALOLA, and FERRARI. "Ball-impact" Piezoelectric Converter for Multi-degree-of-freedom Energy Harvesting from Broadband Low-frequency Vibrations in Autonomous Sensors *Procedia Eng.*, 2014, 21 en junio de 2015

energía a partir de vibraciones, como poder desarrollar un sistema de almacenaje dentro del mismo, y que permita la aplicación tanto a micro sistemas como a dispositivos de baja potencia en general<sup>41</sup>.

Mediante la fabricación de un dispositivo de un generador electromagnético a partir de la repulsión de imanes en un ambiente cerrado inducido por vibraciones de baja frecuencia, se han hecho pruebas en las cuales el objetivo demostrar la eficacia del acoplamiento mecánico para maximizar la cantidad de energía almacenada. Los principales criterios a tener en cuenta son la sincronización de frecuencia y la reducción del amortiguamiento de la estructura. Esta última es fundamental a la hora de evaluar la fricción entre las partes del dispositivo ya que afecta significativamente en la tasa de producción respecto al aumento de frecuencia en las vibraciones<sup>42</sup>.

Como un requerimiento para sensores inalámbricos, el aprovechamiento de la energía a partir de vibraciones es una técnica que ha llamado mucho la atención, teniendo en cuenta que la producción de estos sistemas se acomoda a la baja potencia que estos dispositivos necesitan. Para el correcto funcionamiento de estos sistemas de captación de energía, es que el mecanismo de vibración debe entrar en resonancia con la frecuencia de excitación del mismo, donde la sincronización está dada a partir de la fuerza magnética entre imanes. La idea de este método es que pueda variarse la frecuencia de resonancia con respecto a la frecuencia de esfuerzo para adaptarse a la fuente de excitación<sup>43</sup>. De hecho, en los sensores submarinos, es importante tener una fuente de energía eficiente y que pueda alimentar estos dispositivos de manera casi perpetua, por lo que se han hecho experimentos con elementos piezoeléctricos, mediante el cual se almacena la energía producida para luego alimentar los sensores sin importar la profundidad a la que se encuentren. La idea es utilizar las vibraciones producidas en este ambiente y mediante un sistema híbrido convertir las vibraciones captadas en una fuente de energía eléctrica de baja potencia para alimentar estos sensores que pueden llegar a ser muy pequeños. Para su modelación se tiene en cuenta las condiciones del ambiente, como temperatura presión, y las distancias entre los elementos piezoeléctricos, que determinaran la cantidad de voltaje producida dentro del sistema<sup>44</sup>.

También la distancia entre los imanes permite una variación de estas frecuencias, pero está limitada por el flujo magnético entre ellos. Por ende, se puede optimizar la producción magnética mediante la rigidez de los elementos y su respectiva distancia.

Esto ha generado un gran interés alrededor de sensores submarinos, es importante tener una fuente de energía eficiente y que pueda alimentar estos dispositivos de manera casi perpetua, por lo que se han hecho experimentos con elementos piezoeléctricos, mediante el cual se almacena la energía producida para luego alimentar los sensores sin importar la profundidad a la que se encuentren. La

---

<sup>41</sup> FANG, XU, et al, Fabrication and performance of MEMS-based piezoelectric power generator for vibration energy harvesting *Microelectronics J.*,2006, citado 28 en junio de 2015

<sup>42</sup> KWON, PARK and LAW, "Electromagnetic energy harvester with repulsively stacked multilayer magnets for low frequency vibrations" *Smart Mater. Struct.*,2013, citado 28 en junio de 2015

<sup>43</sup> CHALLA, PRASAD, et al, A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tunability, *Smart Mater. Struct.*, 2008, citado 30 en junio de 2015

<sup>44</sup> SRUJANA, MATHEWS, and HARIGOVINDAN, Multi-source Energy Harvesting System for Underwater Wireless Sensor Networks, *Procedia Comput. Sci.*,2015, citado 25 en junio de 2015

idea es utilizar las vibraciones producidas en este ambiente y mediante un sistema híbrido convertir las vibraciones captadas en una fuente de energía eléctrica de baja potencia para alimentar estos sensores que pueden llegar a ser muy pequeños. Dentro de su modelamiento se deben tener en cuenta las condiciones del ambiente, como temperatura presión, y las distancias entre los elementos piezoeléctricos, que determinaran la cantidad de voltaje producida dentro del sistema.

En otro campo de mecanismos alternativos, ya sea autos o bicicletas, se ha demostrado que mediante una adaptación puede producir y convertir energía mecánica a eléctrica, teniendo en cuenta el suelo donde está en movimiento, ya que en superficies lisas la energía producida es menor a la que se obtiene en terrenos irregulares. Para el estudio realizado, utilizando una bicicleta, se obtuvo como resultado que era más efectivo usar un material piezoeléctrico que una dinamo ya que aumenta la vida útil de la batería. En este generador se han obtenido resultados como la producción de bajas potencias, cercanas a los 3.5 mW en bajas frecuencias, suficiente para dispositivos de bajos consumo como leds o sensores de reconocimiento dentro del vehículo<sup>45</sup>.

Ahora bien, en sistemas aéreos, esta investigación ha permitido el desarrollo de un sistema de condensadores mediante ciertas configuraciones con la idea de maximizar esta captación. La idea está centrada en retener las cargas electrostáticas producidas dentro de la aeronave y poderlas utilizar como generadores de energía. El material de la aeronave determinará las características eléctricas y estáticas de la nave, sabiendo que existe una similitud entre el material metálico con el que generalmente están fabricadas con ciertos materiales a base de fibra de carbono. La idea es recolectar esta energía electrostática presente alrededor de la nave y usar un circuito conversor para obtener una fuente de corriente constante DC<sup>46</sup>.

En el mercado actual existen captadores de energía electromagnéticos que producen niveles de potencias bajas utilizados para micro sensores y dispositivos que se encuentren en áreas remotas, teniendo un bajo consumo en su funcionamiento.

Entre ellos se puede destacar el captador PMG Perpetuum<sup>47</sup> y el Hiper-D<sup>48</sup>. Según las frecuencias que se apliquen a estos captadores, la energía aprovechada genera potencias aproximadas entre 27mW y 79mW, respectivamente. En la tabla 1 se muestra sus principales características.

---

<sup>45</sup> MINAZARA, VASIC, and COSTA, Piezoelectric generator harvesting bike vibrations energy to supply portable devices, ... *Energies Power Qual*, 2008, citado 27 en junio de 2015

<sup>46</sup> XIE, HUANG, GUO, and TORRU, Feasibility of an Electrostatic Energy Harvesting Device for CFCs Aircraft, *Procedia Eng*, 2015, citado 02 en julio de 2015

<sup>47</sup> PERPETUUM LTD, Vibration energy harvesters, 2013, citado 03 en julio de 2016

<sup>48</sup> FLEXOUS, Energy Harvester HiPER-D datasheet V3-01, 2016, citado 03 en julio de 2016

Tabla 1. Comparación de captadores de energía

	PMG Perpetuum	Hiper-D
<b>Potencia generada (mW)</b>	27	79
<b>Corriente de salida(mA)</b>	5,5	14,1 – 23,23
<b>Voltaje de salida (v)</b>	5v	3,4 - 5,6
<b>Dimensiones (mm)</b>	65 * Ø70,4	55 * Ø34,2
<b>Peso (gr)</b>	1030	82
<b>Tiempo de vida aproximada (sin fallas)</b>	20 años	20 años

Fuente: (A) FLEXOUS, datasheet V3-01 captador de energía HiPER-D. (B) PERPETUUM LTD, captadores de energía por vibraciones.

Como se puede observar el captador Hiper-D (figura 12.A), produce mejores resultados, debido a ser la segunda versión de este dispositivo, desarrollado en el año 2016, a diferencia del Perpetuum (figura 12.B), implementado en 2013. Existen otras referencias en el mercado, como el VEH-60<sup>49</sup> y el Micro Gen Bolt<sup>50</sup>, que funcionan de manera similar pero no alcanzan resultados considerables con respecto a los descritos en la tabla.

Figura 12. Captadores de energía. (A)Hiper-D, (B)Perpetuum.



Fuente: (A) FLEXOUS, datasheet V3-01 captador de energía HiPER-D. (B) PERPETUUM LTD, captadores de energía por vibraciones.

Para el desarrollo de los prototipos que se describen en este documento, se tienen en cuenta los factores y características más relevantes de los dispositivos mostrados anteriormente. Es

<sup>49</sup> FERROSOLUTIONS INC, 'Vibration energy harvester from ferro solutions', 2010, citado 03 en julio de 2016

<sup>50</sup> PERROTA Michael, 'Thing power – Bolt power cells energizes "internet of things" applications', 2013, citado 4 en julio de 2016

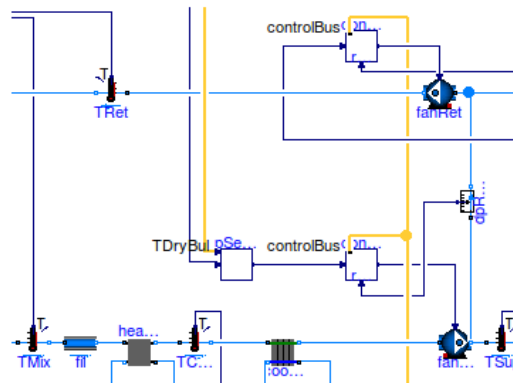
importante mencionar que el enfoque del proyecto es de aprovechar las vibraciones únicamente mediante transducción electromagnética, e implementar para trabajos futuros, análisis de comparación con los dispositivos piezoeléctricos, que son los más aplicados en la industria actualmente, según las referencias mostradas.

### 1.6.3 Desarrollos en Modelica

Las herramientas utilizadas para el modelamiento y a su vez para la simulación han tomado una gran importancia dentro de los sistemas de ingeniería actuales. La creación de librerías para el desarrollo de nuevas aplicaciones permite el desarrollo de proyectos más complejos y con mayor campo de trabajo, como el desarrollado en el instituto nacional de ciencia y tecnología avanzada industrial (AIST). Esta herramienta presenta un modelo integrado con datos numéricos. Lo cual permite calificar el rendimiento del sistema. Dentro de este tipo de aplicaciones existen limitaciones como la definición de conjuntos para determinar una función en términos de un parámetro, que están basados en datos numéricos. Para la aplicación de este tipo de modelos hay que evaluar el tipo de sistema, el cual el objetivo final será generar un análisis de este a partir de la clasificación de sus parámetros respecto a su comportamiento numérico simulado<sup>51</sup>.

La implementación y creación de librerías por diversos desarrolladores, permite elaborar de manera práctica sistemas de energía y control de sistemas varios<sup>52</sup>. A continuación, se muestra un ejemplo de un sistema parcial de control de flujo de volumen (figura 13). La ventaja de este software es su facilidad para combinar diferentes áreas de estudio, eléctrica, mecánica, termodinámica, para desarrollar sistemas complejos en un mismo entorno.

Figura 13. Sistema de flujo de aire desarrollado en Modelica.



Fuente: UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA, Librerías "open source" para construir sistemas de energía y control. URL <http://simulationresearch.lbl.gov/modelica/>

<sup>51</sup> KOMOTO, KONDOH, MASUI, and TEZUKA, Parameter-oriented Visualization of a Modelica Model with a Numerical Data Integration Feature, *Procedia CIRP*, 2014, citado 15 en julio de 2015

<sup>52</sup> UNIVERSITY OF CALIFORNIA, Open source library for building energy and control systems, 2016, citado 04 en julio de 2016

Complementando la modelación mediante este software, se han evaluado estrategias para el diseño de proyectos a partir de simulaciones mediante el compilador modélica, donde las soluciones que muestra están enfocadas a las características de referencia y sobre todo a la orientación de objetos mediante una estrategia de desarrollo conocida como AST, se puede implementar simulaciones donde, utilizando el compilador jmodelica, se pueden obtener programas de optimización ya que permite evaluar un conjunto de atributos del sistema y cuenta con un módulo para revisar los errores dentro de los diagramas. Incluyendo una serie de cálculos específicos, se han desarrollado aplicaciones para interactuar con compiladores java, y así evaluar mediante algoritmos en conjunto con modélica<sup>53</sup>.

Gracias a la interacción entre las diversas herramientas que ofrece Modélica, se han desarrollado proyectos enfocados a el estudio de procesos de energía. Con el fin de demostrar las ventajas de la simulación de este software, y con la posibilidad de utilizar las librerías de conversión de energía en diferentes sistemas diferentes a los propuestos por el software, La universidad de Mälardalen, Suecia, realizo un estudio para modelos y simulaciones de producción de biogás<sup>54</sup>, validando los datos en pruebas en tiempo real. También, se realizaron estudios para optimizar sistemas de alimentación de energía en la universidad de Ilmenau, Alemania<sup>55</sup>, desarrollando una herramienta y la librería respectiva, para alimentación de sistemas con energías renovables. Se utilizó la aplicación Dymola para simular la generación y predicción de datos, además de un enlace con Matlab para desarrollar el control respectivo.

## **1.7 DISEÑO METODOLÓGICO**

### **1.7.1 Metodología Preliminar**

- Para poder plantear el modelo matemático se definirá en primer lugar lo que se quiere evaluar, para este caso, la optimización de un sistema de captación de energía. Se determinará los conceptos teóricos básicos a partir de los autores consultados. Buscando relacionar estos términos, la generación de ecuaciones será el primer enfoque de la investigación, las cuales serán evaluadas y probadas dentro de los sistemas de simulación.
- La realización de uno o más prototipos dependerá de los resultados obtenidos en la experimentación y comprobación de voltaje en la captación de energía. Según los resultados obtenidos, se hará un circuito que permita acondicionar el voltaje variable obtenido, para una salida final DC. El análisis de este prototipo evaluará los elementos claves para el intercambio de información con el usuario, un proceso que permita verificar errores y la aplicación que

---

<sup>53</sup> ÅKESSON, EKMAN, and HEDIN, Implementation of a Modelica compiler using JastAdd attribute grammars, *Sci. Comput. Program*, 2010, citado 18 en julio de 2015

<sup>54</sup> APARICIO Tomas, NORDLANDER, DAHLQUIST, Modelling and Simulating Energy Conversion Processes using Modelica, 2012, citado 15 en agosto de 2016

<sup>55</sup> HOFFMANN, Christian, HORST, Puta, dynamic optimization of energy supply systems with modelica models, 2006, citado 15 en agosto de 2016

tenga en un ambiente real, por lo que se realizarán las pruebas dentro de una plataforma vibratoria, que genere la suficiente energía para comprobar la funcionalidad del prototipo.

- Seleccionar la estrategia de simulación adecuada dependerá en mayor parte de las variables que se analizarán dentro del modelo de captación de energía, por lo que es necesario direccionar la búsqueda del sistema a las incógnitas que se quieren resolver dentro del modelo. Mediante los manuales de estas estrategias, se obtendrá el conocimiento adecuado para seleccionar una de ellas teniendo en cuenta aspectos como los sistemas de simulación, los resultados que se obtienen y las opciones que permiten optimizar el modelo.
- La comparación entre la simulación y la experimentación buscará evaluar los parámetros determinados dentro del modelo. Dentro del análisis in sílico, se realizarán las simulaciones y pruebas en físico, y se extraerán los resultados para poder deducir las conclusiones, obteniendo la viabilidad del modelo o la necesidad de mejoras. Además, la respectiva documentación de los experimentos realizados permitirá tener un registro detallado de los resultados, permitiendo una continua evaluación de las variables del prototipo.



### 1.7.2 Recursos

Elemento	Cantidad	Precio
Imán neodimio 5 Teslas	1	\$ 5.000
Componentes electrónicos varios	-	\$ 35.000
Carcasa impresión 3D	1	\$69.000
Tubo de Nylon 1m	1	\$ 25.000
Resorte aluminio	1	\$5.000
Acrílico 3mm de grosor	-	\$ 50.000
Buje de bronce	1	\$5.000
Bobina 12000 espiras	1	\$100.000
Bobina 7000 espiras	1	\$80.000
Bobina 14000 espiras	1	\$80.000
	Total	\$ 454.000

## 2. DESARROLLO DE MODELOS MATEMÁTICOS

En este capítulo se encontrarán las características generales teóricas para la construcción del dispositivo, para llegar al diseño y construcción del prototipo que se va a generar teniendo en cuenta inducción magnética, campo magnético, sistema dinámico, sistema electromagnético y sistema mecánico. Se establecerá el fundamento matemático para optimización de la captación de energía, teniendo en cuenta las características mostradas en el capítulo 1.

En la figura 30 se explica, mediante un diagrama de flujo, el desarrollo de la simulación y su influencia dentro del proceso de diseño de los dispositivos, buscando optimizar las variables de salida para un prototipo final.

Como lo muestra el diagrama de flujo, la simulación de los prototipos está dada a partir de los parámetros de diseño establecidos inicialmente para cada uno de ellos. Para el proyecto que se explica en este documento, el proceso comienza de manera inversa a los proyectos convencionales, debido a que se construye, en primer lugar, un prototipo. Finalmente, los resultados obtenidos para cada dispositivo construido, serán comparados entre sí, justificando la mejor potencia de salida final para ser aprovechado en aplicaciones futuras.

Figura 14. Diagrama de flujo para desarrollo óptimo.



Fuente: KAZMIERSKI, BEEBY. *Sistemas de captación de energía.*: Springer, 2011, 82 p.

En el modelamiento de la bobina se mostrará las pautas para su respectivo diseño, teniendo en cuenta los valores de corrientes deseados, las propiedades magnéticas, la relación de sus espiras con la fuerza electromotriz y el flujo magnético.

Con respecto al modelamiento dinámico, se evaluará las variables del dispositivo como un sistema masa resorte, a partir de los modelos mostrados por los autores, deduciendo la relación de sus variables con una potencia deseada del sistema, la generación del movimiento junto con la oscilación directamente relacionada con la dimensión del cuerpo de la bobina, incluyendo el número de vueltas, así definiendo unos valores de salida aproximados.

Para los métodos de inducción magnética, se resumen en la ley de Faraday, relacionando el f.e.m inducida a través del cambio de flujo magnético. El flujo magnético es proporcional al valor de líneas de campo magnético que pasan a través de un área definida. En términos matemáticos el flujo magnético es el producto entre el campo magnético B y el área (A) determinada junto al valor unitario en cualquier dirección (n). Su unidad de medida es el weber(Wb).

$$\theta = B (A n) \quad (2.1)$$

Mediante experimentos realizados por varios físicos se comprueba que, al variar el flujo magnético, induce una f.e.m de igual magnitud a la variación por unidad de tiempo del flujo inducido. La f.e.m se distribuye por toda la bobina, pero sin conservarse.

El principio físico de la ley de Faraday que representa la dirección de la f.e.m con un signo negativo, junto a la ley de Lenz es posible determinar la dirección y sentido de la f.e.m, demostrando que la corriente inducida en las espiras de la bobina produce un campo magnético propio, oponiéndose al flujo magnético del imán, donde se ve reflejado que al aumentar las distancias entre el imán y las espiras del embobinado el flujo disminuye y la corriente ira en sentido contrario a la dirección inicial.

A partir de estos conceptos físicos se va a desarrollar un modelo descriptivo para el funcionamiento de los prototipos propuestos, se utilizó un imán de neodimio redondo de 5 Teslas, monopolar en cada cara para evitar variaciones en la f.e.m inducida, sin tener variaciones en los modelos matemáticos que se van a presentar a continuación.

De igual manera se utilizaron las formulas físicas mencionadas en capítulos anteriores, sin dejar atrás los cálculos que se tuvieron en cuenta para realizar una bobina con los parámetros correctos además las formulas, calibres y desarrollos propuestos por los autores <sup>56</sup> y <sup>57</sup>.

## 2.1 INDUCCIÓN DE VOLTAJE Y SISTEMA ELÉCTRICO

El flujo magnético generado por el imán a través de su desplazamiento, permite la inducción de voltaje a través de la bobina. En la figura 14 se muestra el diagrama del comportamiento del imán con respecto a la bobina. Es importante mencionar que, gracias a esta relación, se opta por

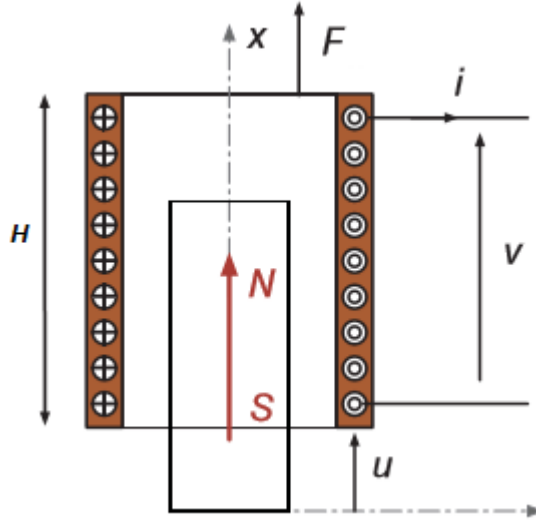
---

<sup>56</sup> PRIYA, Shashank, INMAN, Daniel. Energy Harvesting Technologies, Blacksburg.: Springer, 2009, 20 p., citado en noviembre de 2015

<sup>57</sup> SPREEMAN, Dirk, MANOLI, Yiannos. Electromagnetic vibration energy harvesting devices: Springer,2012,22, citado en noviembre de 2015

desarrollar un sistema masa resorte con el fin de mantener un movimiento relativo del imán, aprovechando la totalidad de la altura de la bobina, y así generar el mayor voltaje inducido (f.e.m).

Figura 15. Diagrama de relación entre bobina e imán



Fuente: BRIAND, YEATMAN. *Micro captación de energía. Capítulo 3, p. 28.*

Para obtener un sistema que permita la inducción de voltaje, se realiza un movimiento relativo  $u$ , dentro de la bobina. Es importante mencionar que la geometría de la sección S influye directamente en el análisis de campo inducido, por lo que se tendrán en cuenta dos diseños preliminares, uno cuadrado, ya que su construcción permite un ambiente donde el imán tiene contacto directo con la bobina, y otro circular, el recomendado por los autores y el utilizado por los dispositivos del mercado (sección 1.4).

El flujo magnético total producido en la bobina esta descrito en la siguiente ecuación

$$\Phi_{CM}(u) = \int_u^{u+H} \varphi_{CM}(x) \frac{N}{H} dx \quad (2.2)$$

Donde

$\varphi_{CM}$  es el flujo magnético generado por el imán

$N$  es el número de espiras de la bobina

$H$  es la altura de la bobina

La ecuación 2.2 indica entonces que un voltaje inducido (f.e.m), será generado cuando existe un desplazamiento relativo entre el imán y la bobina, y cuando el flujo magnético total a través de la bobina varia con la posición relativa entre estos dos elementos. Este movimiento será producido por las vibraciones que funcionan como la fuerza inicial para que el imán comience a inducir campo magnético en la bobina. Este voltaje inducido está dado por

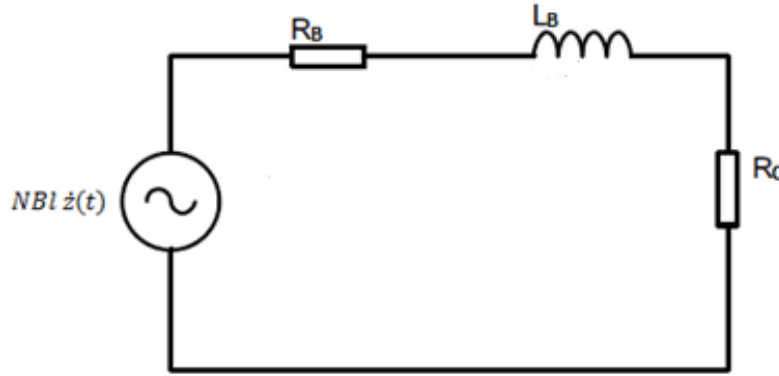
$$\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.3)$$

A partir de la ecuación 2.3, es importante aclarar que la inducción electromagnética no dependerá del elemento que se esté desplazando, ya sea un imán a través de la bobina, o si dicha bobina se mueve alrededor de un imán fijo. Debido a los diferentes diseños de bobinas que pueden adaptarse entonces para realizar este comportamiento, se busca simplificar la fórmula para una bobina con  $N$  número de espiras, con una altura  $l$  y un campo magnético  $B$  inducido por el imán, obteniendo la siguiente ecuación para un voltaje inducido f.e.m

$$\varepsilon = -NBl\dot{z} \quad (2.4)$$

Para describir el comportamiento y la implementación de estos captadores a partir de vibraciones, la cara eléctrica será evaluada realizando una analogía para evaluar el comportamiento del captador como un circuito eléctrico. La figura muestra el circuito RL que tiene en cuenta una resistencia de la bobina  $R_B$ , la respectiva inductancia  $L_B$  y una resistencia de carga  $R_C$ , como referencia para el voltaje de salida.

Figura 16. Comportamiento de captador de energía como circuito eléctrico



Fuente: Propia del autor.

La ecuación 2.5 es la resultante para describir el comportamiento de este sistema, aplicando la ley de Kirchhoff.

$$L_B \frac{di(t)}{dt} + (R_B + R_C)i(t) = -NBl \frac{dz(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Finalmente, la función de transferencia, aplicando transformada de Laplace, que muestra el comportamiento del voltaje de salida  $V$  a partir de un desplazamiento  $Z$  se observa en la ecuación 2.6.

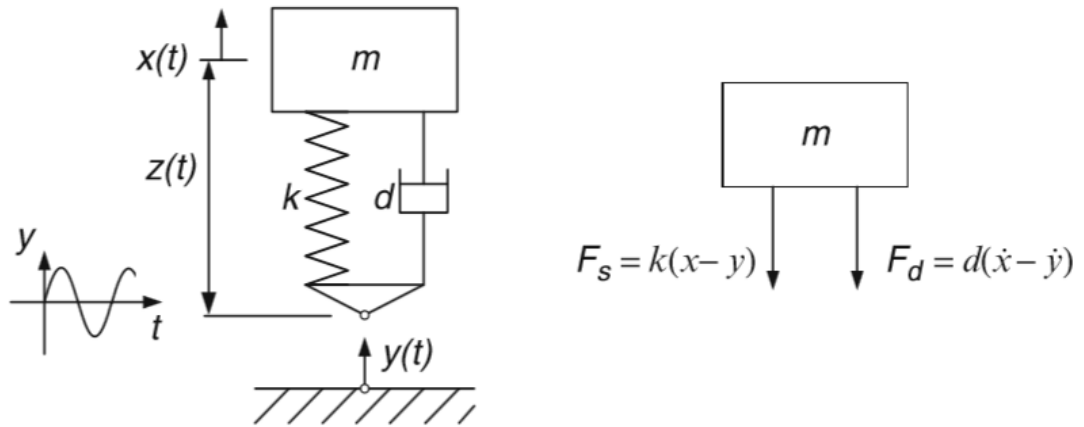
$$Ge(s) = \frac{V(s)}{Z(s)} = \frac{-NBlR_C s}{L_B s + R_B + R_C} \quad (2.6)$$

## 2.2 SUBSISTEMA MECÁNICO

La función principal de este tipo de captadores electromagnéticos es la conversión de energía mecánica en eléctrica. Sin embargo, esta energía obtenida por las vibraciones es extraída amortiguando esta vibración. Es importante mencionar que para estos transductores de vibración se asume que la masa del sistema no tiene efecto en la fuente de vibración, siempre y cuando la fuente de vibración sea mucho más grande que la masa del imán.

Para evaluar el comportamiento mecánico, se tiene el sistema masa resorte mostrado en la figura 16, donde se describe un sistema masa resorte lineal donde la masa  $m$ (imán), está unida a un resorte de constante  $k$  y una constante de amortiguamiento  $d$ , siendo para este caso el rozamiento entre el eje y el buje.

Figura 17. Modelo de Sistema masa resorte



Fuente: SPREEMANN, MANOLI. Dispositivos captadores de energía electromagnética por vibraciones. Capítulo 2, p. 14.

La figura 14 describe también el diagrama de cuerpo libre de la masa para desarrollar la función de transferencia con las respectivas fuerzas del resorte y del amortiguamiento. Esta función se muestra a continuación

$$m\ddot{x} = -k(x - y) - d(\dot{x} - \dot{y}) \quad (2.7)$$

La excitación  $y(t)$  es una función armónica con una amplitud  $Y$ , que definirá el comportamiento constante del imán. Aplicando transformada de Laplace, se puede obtener el comportamiento del sistema a partir de un desplazamiento  $Z$  a partir de la fuerza  $Y$ , como lo expresa la siguiente ecuación

$$(ms^2 + ds + k)Z(s) = -ms^2Y(s) \quad (2.8)$$

Finalmente, la ecuación del sistema mecánico  $G_m(s)$ , se muestra a continuación

$$G_m(s) = \frac{Z(s)}{Y(s)} = \frac{-ms^2}{ms^2 + ds + k} \quad (2.9)$$

Este modelo permitirá identificar el comportamiento de los parámetros mecánicos, e implementarlos en las futuras simulaciones. Es importante mencionar que las variables para describir el modelo mecánico se obtienen posteriormente construido el prototipo. Por esta razón, se optó por desarrollarlos similares a los descritos en el estado del arte, con la finalidad de implementar una simulación acorde a estas variables y compararlos a los resultados obtenidos en las respectivas pruebas de funcionamiento.

### 2.3 POTENCIAL ELÉCTRICO

Definiendo potencial eléctrico como energía eléctrica por unidad de carga siendo su unidad el voltio, es necesario tener en cuenta un punto de referencia que puede ser arbitrario y mediante un análisis del diferencial de potencial se podrá realizar la medición adecuada. Este diferencial de potencial está definido por la cantidad de carga que se puede adquirir en un punto, en términos mecánicos, es el trabajo que se debe efectuar para mover una carga respectiva de un punto a otro.

Una vez la fuerza electromagnética es cero, las fuerzas f.e.m junto con la corriente causada por los campos magnéticos variables se denominan corrientes inducidas, a esto se le denomina inducción magnética.

Un campo magnético variable puede producirse por el desplazamiento de un imán. También puede producirse una corriente inducida si la bobina se aleja o se acerca al conductor, de igual manera sucede si la bobina gira alrededor de un campo magnético fijo (generador). A continuación, se muestra la ecuación de potencia con respecto al comportamiento del sistema masa resorte, en el dominio de frecuencia.

$$P_e(W) = \frac{|V(jw)|^2}{2R_L} = \frac{Y_o^2}{2R_L} \left| \frac{-\tau W j W}{(W_C + j W)(W_n^2 - W^2 + 2\xi W_n j W) + \frac{\alpha \lambda w j w}{m}} \right| \quad (2.10)$$

### 2.4 COMPORTAMIENTO

Los sistemas mecánicos y 2.9.

$$W_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

AL

$$\xi = \sqrt{\frac{d}{2mW_n}}$$

ación

$$W = W_n$$

s ecuaciones 2.6

$$= \frac{NBLR_C}{(mS^2 + dms + k)(LS + R_C R_B) + NBL^2} \quad (2.11)$$

Donde

$$-NBL\dot{Z} = LR_B + L \frac{di}{dt} + V_R \quad (2.12)$$

$$-NBLSZ(S) = I(S)R_B + LSI(S) + V_R \quad (2.13)$$

Se debe tener en cuenta para el procedimiento que la corriente esta descrita po la ecuación 2.14

$$I(S) = \frac{V_R}{R_C} \quad (2.14)$$

La fuerza electromotriz está dada por la siguiente ecuación

$$F = \frac{(NBI)^2}{R_C + R_L} SZ \quad (2.15)$$

Reemplazando en 2.10, se obtiene la ecuación 2.16

$$-NBLSZ(S) = \frac{V_R}{R_C} R_{Co} + LS \frac{V_R}{R_C} + V_R \quad (2.16)$$

$$-NBLSZ(S) = V_R \left( \frac{R_B}{R_B} + \frac{LS}{R_C} + 1 \right) \quad (2.17)$$

Finalmente, la ecuación de corriente está dada por la siguiente ecuación

$$-NBLSZ(S) = V_R \left( \frac{R_B + R_C + LS}{R_C} \right) \quad (2.18)$$

Finalmente, la ecuación del modelo matemático que une el sistema eléctrico y mecánico está dado por la siguiente función de transferencia

$$Z(S) = \frac{\left( \frac{1}{mS^2 + dmS + K} \right) \left( \frac{-NBIR_C S}{R_B + R_C + LS} \right)}{1 + \left( \frac{1}{mS^2 + dmS + K} \right) \left( \frac{-NBIR_{Lo} S}{R_B + R_C + LS} \right) \left( \frac{NBI}{R_C^2} \right)} \quad (2.19)$$

Simplificando la ecuación

$$Z(S) = \frac{NBIR_C S}{(mS^2 + dmS + K)(R_B + R_C + LS) \left( \frac{NBI^2}{R_C} S \right)} \quad (2.20)$$

El sistema eléctrico finalmente se expresa mediante la siguiente ecuación

$$\frac{V_R}{Z(S)} = \frac{-NBIR_C S}{R_B + R_C + LS} \quad (2.21)$$

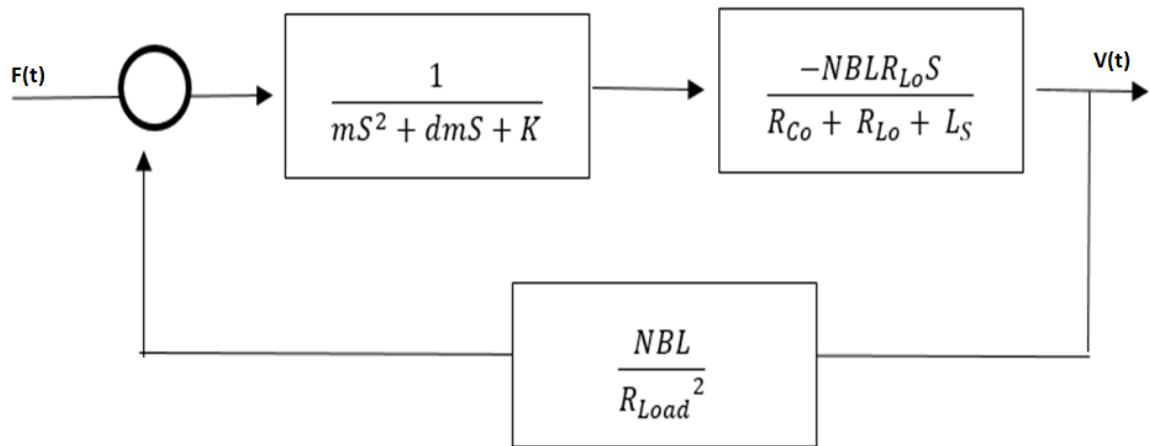
De igual manera, el sistema mecánico esta expresado por la siguiente ecuación



$$\frac{Z(S)}{F(S)} = \frac{1}{mS^2 + dmS + K} \quad (2.22)$$

El diagrama de bloques mostrado en la figura será el utilizado para las pruebas de simulación y determinar el comportamiento general de la captación de energía implementada en los diferentes prototipos.

*Figura 18. Diagrama de bloques*



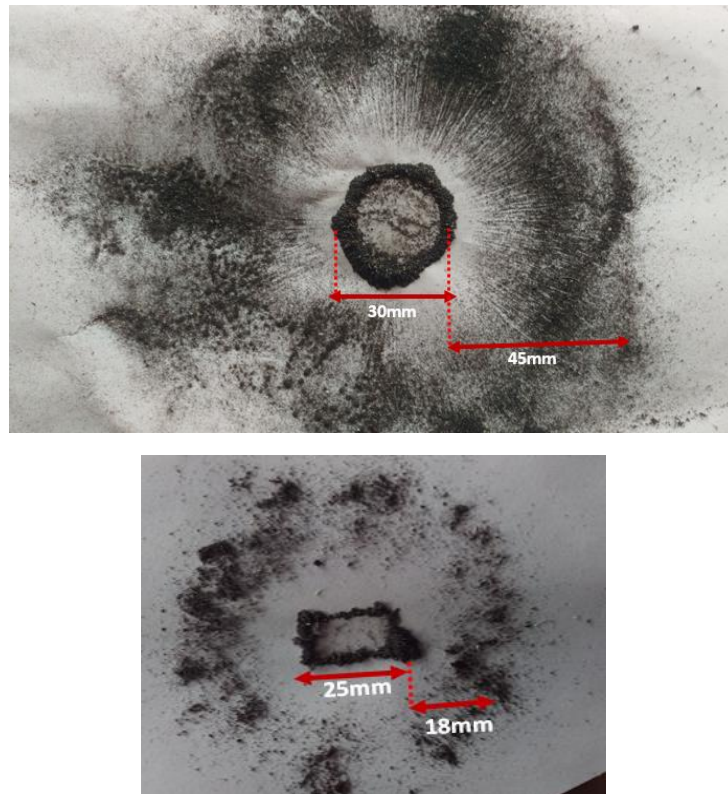
*Fuente: Propia del autor*

### 3. METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO

En este capítulo se muestra el desarrollo general para la construcción del prototipo con base en los conocimientos desarrollados en los capítulos anteriores. En primer lugar, se busca realizar un prototipo con tamaños similares a los dispositivos del mercado actual (véase sección 1.4), con dimensiones para el embobinado entre los 3-5 cm y con área entre 5 y 10 cm<sup>2</sup>. También, se opta por aumentar la escala de los diseños para generar un voltaje de salida mayor a los mostrados en el estado del arte, y de esta manera facilitar el análisis final de las variables resultantes.

Inicialmente se realizan pruebas para identificar el comportamiento del imán, con el fin de saber cuál de las dos formas, cuadrada o circular, se adapta mejor y ofrece un campo magnético adecuado para los prototipos. Mediante una prueba con limadura de hierro, se observa el espectro magnético, con el objetivo de verificar los monopolos del imán y así, identificar la influencia magnética en el espacio<sup>58</sup>. La figura 18 muestra la influencia magnética producida por cada imán, donde se puede observar que el imán redondo tiene mayor magnitud de espectro, debido a su campo magnético de 5T, a diferencia del imán cuadrado que posee un campo magnético de 3T (según fabricante “Dimetales”).

*Figura 19. Campo magnético de imanes mostrado con limadura de hierro*



*Fuente: Propia del autor*

<sup>58</sup> EXPOSITO, Pedro, Campo magnético, Platea , citado 15 en diciembre de 2016

Es importante mencionar que, para la construcción general de los prototipos, se utilizan materiales con coeficiente magnéticos bajos para minimizar las pérdidas de campo y optimizar el voltaje obtenido en la captación de energía. Una vez obtenidos los materiales adecuados, se busca realizar las pruebas con frecuencias similares generadas a partir del movimiento humano<sup>59</sup>, ya que estas permiten obtener bajos niveles de potencia.

### 3.1 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En primera instancia se consulta los diferentes calibres para la construcción óptima de la bobina, ya que en el mercado existe gran variedad de estos para realizarla. La mayoría de los calibres comerciales están diseñados para la construcción de motores o transformadores a gran escala, además de parlantes o aplicaciones cotidianas en la ingeniería. Por el contrario, a estas aplicaciones, los rangos de calibres oscilan en diámetros muy reducidos, como se muestra en la tabla 3.

*Tabla 2. Tabla de valores y propiedades de cobre fino.*

AWG No	DIAMETRO DE COBRE ( $\mu m$ )	DIAMETRO DEL CABLE (INCLUYENDO AISLAMIENTO) ( $\mu m$ )	RESISTENCIA ( $\Omega/m$ )
58	10	10.6 – 12.9	0.22
57	11	11.7 – 14.1	0.18
55	14	14.7 – 17.8	0.11
54	15.8	16.5 – 19	0.09
53	17.8	18.5 – 21.6	0.07
52	20	21.6 – 25.4	0.056
51	22	24.1 – 27.8	0.044
50	25	26.7 – 30.5	0.035
49	28	29.7 – 33	0.028
48	31.5	32.8 – 38.1	0.022
47	35.6	36.8 – 43.2	0.017
40	79,9	80 – 87	0,00344
35	143	143-151	0,00108

*Fuente: SHASHANK, INMAN. Tecnología de captadores de energía.*

---

<sup>59</sup> Digikey, harvested RF Powers Remote sensors, citado 15 en diciembre en 2016

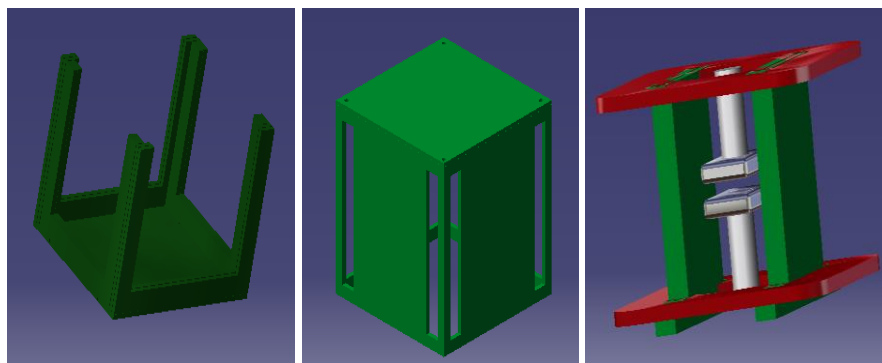
Los rangos mostrados en la tabla anterior están diseñados para aplicaciones muy específicas, por lo que la oferta en el mercado es muy reducida. El calibre aproximado utilizado fue el calibre 40, ya que su relación de costo con el prototipo se adecúa a los objetivos. La implementación de un calibre menor genera un mayor costo, el tiempo de entrega del producto es mayor ya que es necesario importarlo o las empresas que cuentan con estos productos exigen una compra de una cantidad considerable de material. Además, al ser un calibre tan delgado, implica una manipulación muy precisa para la fabricación de la bobina dado que puede generarse una ruptura en cualquier espira.

A partir del cable de calibre 40, Se realizan los diseños para obtener una bobina cuadrada con el objetivo de generar una construcción rápida ya que es más práctico al momento de crear un ambiente adecuado para el contacto directo entre el campo magnético producido por el imán con las espiras de cobre, además de facilidad en el análisis de resultados. La idea principal para el diseño es crear una estructura modular que fuera práctica para la elaboración de la del embobinado. La característica principal que debe tener la estructura es su bajo o nulo nivel de magnetismo, por esta razón se opta por utilizar acrílico de 3mm de espesor ya que es un material muy versátil y se adecúa a la fabricación de estructuras modulares, y por la facilidad de contar con una cortadora láser (empresa JR Publick Laser SAS).

Las estructuras modulares diseñadas se muestran en la figura 19. La primera estructura no cuenta con la rigidez suficiente en los paraleles para soportar la compresión que generaba el número de espiras, por lo que se decide cambiar el diseño con otro tipo de paraleles. Debido a la falencia por escasa resistencia en los paraleles que soportan la bobina, se implementa un cambio en la estructura de estos, igualmente modulares, pero al sostener la cantidad de espiras genera un efecto de compresión en la estructura que a corto plazo impide el movimiento del imán y posteriormente su ruptura.

Adicionalmente, con este sistema modular se hacen las pruebas de resistencia y de movimiento para la generación de campo magnético con dos imanes de movimiento vertical opuesto, donde únicamente la mitad del recubrimiento de la bobina está en contacto directo con el campo producido por el imán. Debido a que el movimiento de los dos imanes no es totalmente rectilíneo, se modifica la longitud del vástago, trabajando con un solo imán ya que los dos imanes por su naturaleza bipolar a largo plazo tienden a atraerse sus polos contrarios.

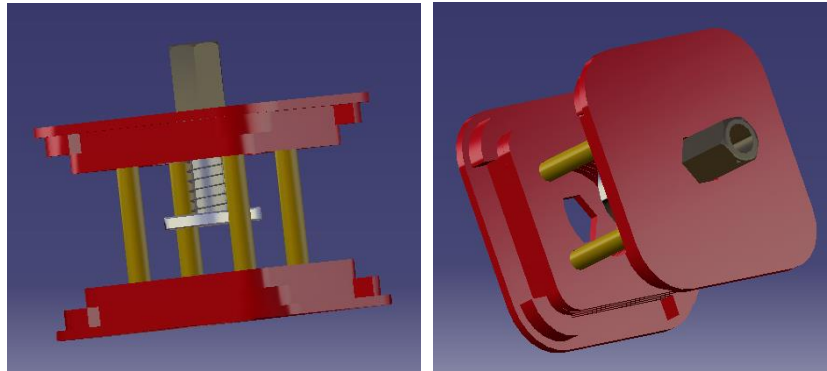
*Figura 20. Diseños estructurales modulares*



*Fuente: Propia del autor.*

Con estas variables se decide dejar a un lado el sistema modular en la bobina y construir un sistema entero para evitar las implicaciones mecánicas y de resistencia. Este sistema genera más facilidad al momento de la construcción de la bobina, como se observa en la figura 20, un sistema de 4 columnas unidas a varias capas de acrílico de 3 mm de grosor para garantizar que la bobina se mantenga compacta y no afecte el movimiento del imán.

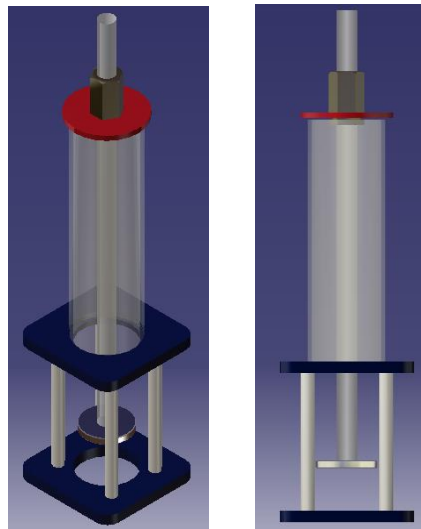
*Figura 21. Estructura no modular para la bobina*



*Fuente: Propia del autor.*

Debido a los bajos niveles de voltaje producidos dentro de este dispositivo, se realiza un segundo diseño, de forma cuadrada también, duplicando el valor de altura de la bobina anterior, puesto que la longitud del prototipo obedece también a la dependencia que tiene el voltaje producido con respecto a la distancia que recorre el imán, tal como se ve en la etapa de modelamiento. Adicionalmente, se aumenta el área de contacto de campo magnético y se diseña una zona circular mayor para el imán, ya que en la estructura anterior se producen rupturas en el alambre causadas por el contacto directo entre estos dos elementos. La estructura es similar a la anterior, pero con dimensiones mayores para maximizar el voltaje de salida, mostrada en la figura 21.

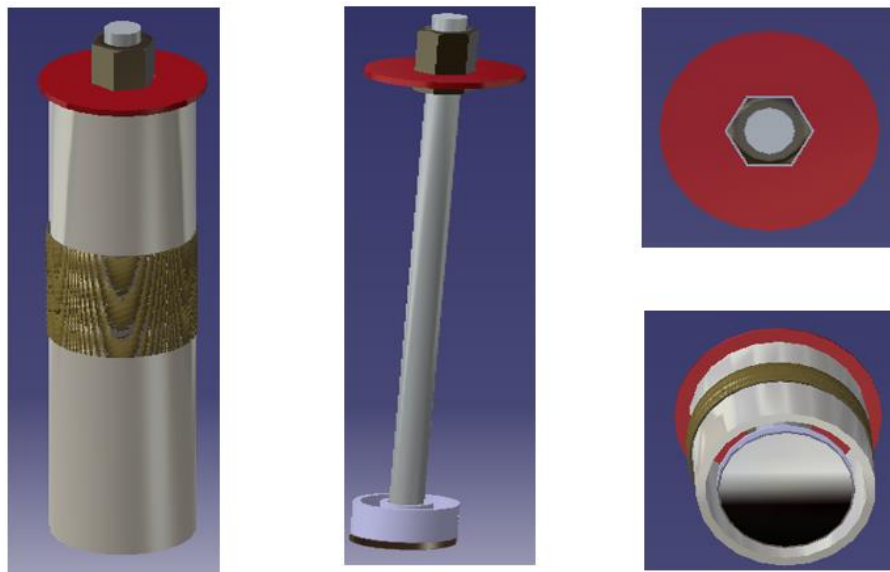
*Figura 22. Segunda Estructura no modular*



*Fuente: Propia del autor.*

Los valores de voltaje para este dispositivo son aceptables, pero tarda mucho tiempo en generarlo y adecuar la señal para una rectificación correcta (aproximadamente 40 segundos), por lo que se realiza un último prototipo de forma cilíndrica, donde el imán se desplaza dentro de un tubo de acrílico de 3mm de espesor, de tal manera que exista una mínima distancia entre la bobina y el imán, evitando pérdidas de energía considerables en el sistema. En la pared exterior del tubo se incorpora la bobina en la región donde el imán se desplaza el mayor valor de tiempo. Es importante aclarar que no se realiza la bobina en la totalidad del tubo por la relación de distancia entre la bobina y el punto final del desplazamiento del imán, como se explica en el capítulo anterior. Finalmente se construye un tubo exterior de protección para la bobina, y se acopla un espacio para el circuito rectificador, como se observa en la figura 28.

*Figura 28. Estructura prototipo final*



*Fuente: Propia del autor.*

### **3.2 SISTEMA MASA RESORTE**

El sistema masa resorte tiene como función proporcionar el movimiento rectilíneo del imán para que pueda generar un valor constante de voltaje dentro de la bobina. Son requeridos materiales que tengan un valor magnético mínimo, pero con una resistencia al desgaste considerable debido a la versatilidad requerida en las aplicaciones del dispositivo. De acuerdo a lo explicado en el capítulo anterior, la energía que se obtiene de las vibraciones se toma a partir de la amortiguación que se aplique en el sistema, para este caso esta variable es dada por la fricción que se genera en el movimiento del eje que mantiene al imán realizando un movimiento rectilíneo.

Debido a esta fricción, se buscan materiales que tengan bajos coeficientes de fricción y que a su vez tengan niveles de magnetismo muy bajos.

Inicialmente el vástago está hecho en aluminio, ya que al ser un metal paramagnético<sup>60</sup>, se evita una variación considerable de campo magnético dentro del dispositivo que afecte el voltaje producido en la bobina. Aunque este material tiene un bajo nivel de magnetismo, se presenta pérdidas en el movimiento del sistema masa resorte, debido al rozamiento producido entre el vástago y el buje de bronce. En la tabla 4 se muestra el comportamiento de rozamiento de materiales que se usan para estas funciones. Para evitar este tipo de rozamiento, se consulta también técnicas de tribología con aceites que permitan mejorar el movimiento rectilíneo. Es importante mencionar que no se tiene en cuenta la temperatura de éstos puesto que el dispositivo no trabaja a grandes velocidades. Para el prototipo final, se realiza un vástago de nylon dado que su coeficiente de rozamiento es casi nulo, similar al teflón, evitando usar lubricantes o materiales externos al dispositivo que pudiesen afectar el movimiento natural del sistema.

*Tabla 3. Coeficientes de rozamiento*

Materiales en contacto	Coeficiente estático	Coeficiente cinético
Cobre/Acero	0,53	0,36
Aluminio/Acero	0,61	0,47
Caucho/Concreto	1	0,8
Bronce/Bronce	0,2	0,2
Caucho/cemento	1	0,8
Cobre/Hierro	1,1	0,3
Acero/Teflón	0,04	0,04

*Fuente: VFISICA. Tablas de valores de los coeficientes. URL <https://vallyblog.wordpress.com/fisica-2013/2-periodo/friccion/coeficiente-de-friccion/tablas-de-valores-de-los-coeficientes/>*

Con el fin de aumentar el campo magnético producido, se opta por un diseño con dos imanes (uno en movimiento con el resorte y otro fijo a la base), de manera que el sistema masa resorte esté activo por la repulsión de estos. Aunque la idea permite un libre movimiento en el imán, los campos magnéticos de estos imanes interfieren directamente con la bobina generando una cancelación de

---

<sup>60</sup> COMPARE METALS, aluminio propiedades magnéticas, 2015, citado 11 octubre en 2016

los campos y generando una corriente muy baja dentro de la bobina. También se presentan incongruencias para pensar en un diseño mecánico que sostenga el sistema y fuera de larga duración, dado que los imanes de neodimio presentan una fuerza de atracción alta que a largo plazo daña el dispositivo.

Otra limitación que se presenta, fue el mantener en un relativo equilibrio los imanes, ya que la repulsión ocurre en el centro ideal de los imanes, pero se presentan desviaciones del imán en movimiento con respecto al tiempo ya que busca atraerse con el polo contrario del imán fijo.

En la tabla 5 se muestran las características de los elementos que se utilizan para el sistema masa resorte.

*Tabla 4. Materiales de sistema masa resorte*

	DIMENSIONES (mm)	MATERIAL	MAGNETISMO (T)	COEFICIENTE DE FRICCION
IMAN	Ø30, 3.5 ancho	Neodimio (NdFeB)	5	No aplica
VASTAGO	245	Nylon	No aplica	≈ 0,04
RESORTE	Ø 0.60, altura 30	Acero inoxidable 302	No aplica	No aplica
BUJE	lados 8.6, 28 altura	Bronce	No aplica	≈ 0,04
CARCASA	φ30, altura 15	Acrílico	Nulo	No aplica

*Fuente: Propia del autor.*

La segunda implicación que tiene este sistema fue tener en cuenta que tipo de resorte manejar, de compresión o de elongación. Inicialmente, se realiza un dispositivo con un resorte de compresión.

En la figura 22 se observa la configuración con este tipo resorte. El dispositivo no funciona debido a que se requiere una fuerza de gran magnitud para que el imán oscile, por la resistencia que genera al resorte a elongarse, no cumpliendo con el objetivo ya que se necesita un efecto contrario al imán para que este funcione adecuadamente.



*Figura 23. Sistema masa resorte con resorte de compresión*



*Fuente: Propia del autor.*

Con el resorte de elongación se modifica el diseño de la bobina (sección anterior), realizando el sistema masa resorte con mayor longitud en el vástago para optimizar el movimiento del imán (figura 23). De esta manera, puede tener un recorrido más largo y oscilar libremente, sin necesidad de un impulso para realizar la función de producir el campo magnético dentro de la bobina.

*Figura 24. Sistema masa resorte con resorte de elongación*



*Fuente: Propia del autor.*

Para unir el imán con el resorte se construye un acople en acrílico para que las espiras no afecten el campo magnético producido. Finalmente se realiza una base que protege al sistema del exterior con un buje en la parte superior para que el recorrido del eje sea totalmente recto, para finalmente unir el sistema con la estructura de la bobina, como se observa en la figura 24. Es importante mencionar que el sistema masa resorte mostrado en la figura 23 se utiliza para las pruebas correspondientes a

las 3 estructuras de bobina que se implementan, para generar un parámetro de comparación unificado en el análisis de funcionamiento.

*Figura 25. Sistema masa resorte final acoplado a los diferentes dispositivos*



*Fuente: Propia del autor.*

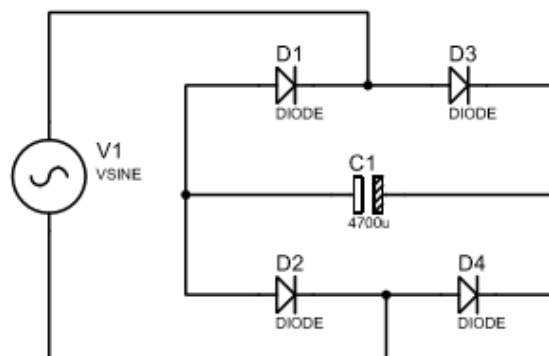
### 3.3 CIRCUITO ELÉCTRICO

El voltaje que se produce en la captación de energía es de corriente alterna, por lo que se requiere un circuito que permita rectificar y regular dicho voltaje para obtener una salida en DC, y de esa manera alimentar la respectiva carga.

Se debe tener en cuenta los picos de voltaje generados en esta parte de captación, ya que, al no ser muy altos, se necesita disminuir el consumo de los componentes electrónicos del circuito para maximizar la potencia de salida.

En primera instancia, se busca rectificar el voltaje mediante un puente rectificador, como se observa en la figura 25, con diodos Schottky (de germanio), ya que su voltaje de activación es de 0.3v, a diferencia de los diodos de silicio que requieren 0,7v.

*Figura 26. Circuito rectificación puente de diodos*

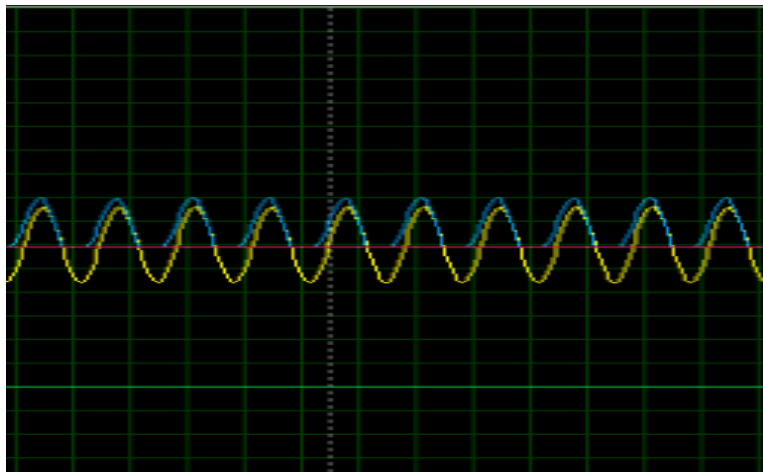


*Fuente: Propia del autor.*

Es importante señalar que la señal de voltaje que se obtiene en la simulación es constante y mantiene su comportamiento senoidal debido a sus condiciones ideales, a diferencia de la señal de voltaje que se obtiene en los prototipos, ya que depende de factores como la frecuencia, la amplitud constante, y del tiempo que tarda el imán en inducir el campo magnético a través de la totalidad de la bobina, para generar dicha señal de voltaje adecuada y ser acondicionada en esta etapa de regulación.

En caso de variación en la frecuencia, la señal se mantendrá armónica pero su amplitud disminuirá, sin embargo, mantendrá la señal rectificada en el tiempo, como se observa en la figura 26. De igual manera, si la frecuencia aumenta considerablemente (100 Hz mayor que la actual) y la amplitud disminuye, los picos se verán reducidos y por ende el voltaje DC de salida.

*Figura 27. Señal de voltaje rectificada*



*Fuente: Propia del autor.*

Obteniendo una señal armónica rectificada, lo siguiente es almacenar el voltaje obtenido en capacitancias que permitirán mantenerlo en un periodo de tiempo posterior al funcionamiento del dispositivo. Su función es también mantener un promedio del voltaje producido y que así el regulador se mantenga activo.

Debido al nivel de voltaje que se genera (dependiendo del prototipo, variando entre 2-6 V aproximadamente), se opta por buscar un regulador con el menor consumo posible para que se active, el cual es el NTE 1904, proveniente de fabricante americano, que tiene como ventaja principal su precisión a diferencia de otras referencias comerciales (variantes de LM117x), descritas en la tabla 6.

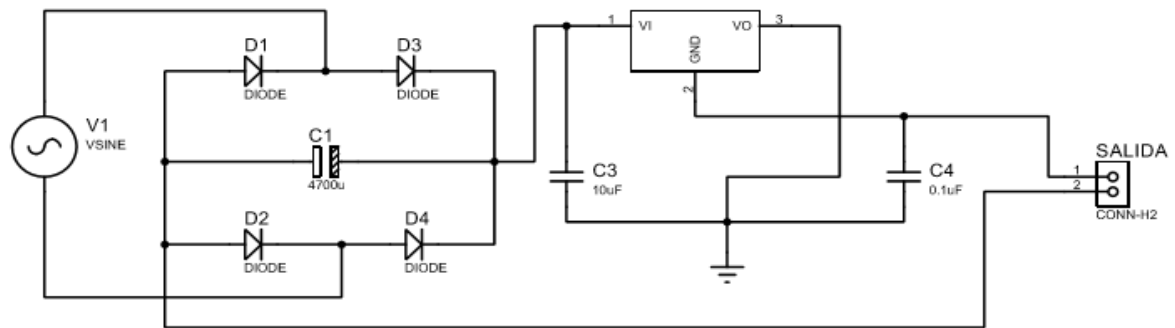
El circuito completo para la obtención del voltaje DC se muestra en la figura 27. Cabe aclarar que la configuración del regulador se completa según lo recomendado por el fabricante para su funcionamiento a 3,3v. Sin embargo, el regulador NTE no tuvo reacción frente al voltaje proveniente de la rectificación, por lo que se implementa el circuito con el LM117T.

Tabla 5. Referencias de reguladores.

	$V_{in}$ (v)	$V_{out}$ (v) (según configuración)	$I_{out\ max}$ (A)
Kd1084	12	1,5 – 1,8 – 2,5 – 3,3 – 5	5
AS2830	7	1,5 – 2,5 – 3,3 – 5	3
SPX1086	7	1,5 – 2,5 – 3,3 – 5	1,5
LM 7805	10	5	0,5
CLM2815	7	1,5 – 3,3 – 5	1,5
LM 7812	35	12	2,2
LM 1117T	7	1,5 – 1,8 – 2,5 – 3 – 3,3 – 5	1

Fuente: ALL DATASHEET. Reguladores de voltaje fijo y ajustable de baja salida. URL <http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=LOW%20DROP%20FIXED%20AND%20ADJUSTABLE%20POSITIVE%20VOLTAGE%20REGULATORS>

Figura 28. Circuito rectificador puente de diodos y regulador



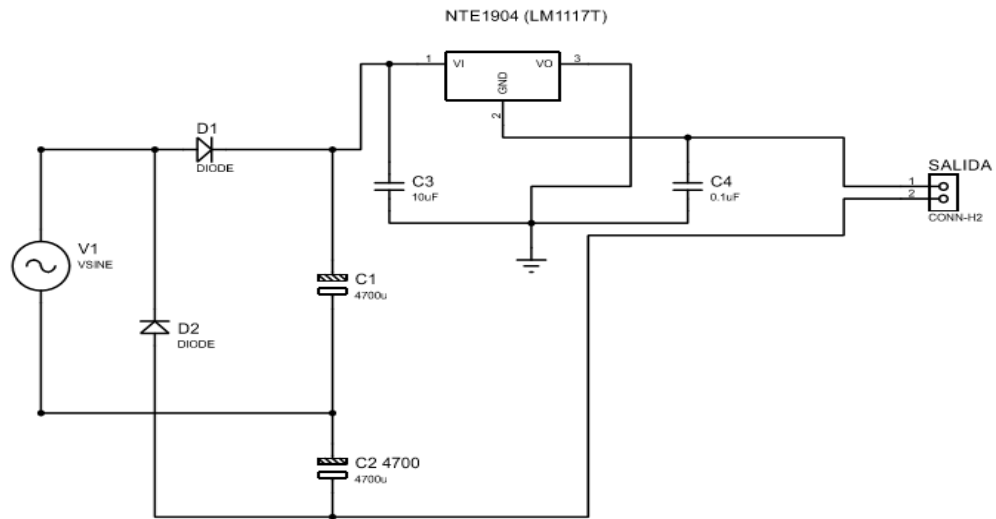
Fuente: Propia del autor.

Es importante mencionar que medición de voltaje en la salida no varía si se cambia la capacitancia, solo se mantiene un mayor tiempo constante dentro de la carga, y que entre más consumo tenga la carga, mayor será el valor de capacitancia para que se active correctamente.

Al no tener una conformidad sobre el voltaje de salida, se busca una alternativa al circuito rectificador, por lo que se realiza un circuito duplicador de voltaje. Este circuito cuenta con dos capacitores que se encargan de almacenar el voltaje en los dos semiciclos (positivo y negativo), duplicando el valor pico de voltaje en la salida. Sin embargo, con las posibilidades que se mencionan anteriormente no hay manera de aumentar la corriente y mantenerla constante en el tiempo. Se consultan entonces, referencias de dispositivos que ya existen en el mercado para encontrar un promedio de corriente producida por estos dispositivos y conocer la corriente máxima que se puede producir en este tipo de captadores ya que estos están enfocados como nuestro proyecto en bajas potencias.

Finalmente se opta por dejar el circuito de duplicador de voltaje acoplado al dispositivo, como se muestra en la figura 28, generando una mayor eficiencia al momento de obtener un voltaje de salida.

*Figura 29. Circuito rectificador con duplicador de voltaje y regulador*



*Fuente: Propia del autor.*

La figura 29 muestra el prototipo final acoplado al circuito de regulación y rectificación, mediante el cual, se pueden realizar pruebas contundentes para mostrar el comportamiento del voltaje frente a diferentes evaluaciones de funcionamiento. En el capítulo de las pruebas y análisis de resultados, se observa la considerable mejora obtenida con el duplicador de voltaje, permitiendo mantener un voltaje constante en diferentes frecuencias de trabajo.

*Figura 30. Prototipo final*



*Fuente: Propia del autor.*

#### 4. IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE MODÉLICA PARA EL DISEÑO DEL DISPOSITIVO

---

Mediante el lenguaje orientado a objetos MODÉLICA, se realizaron las simulaciones pertinentes a partir de las características de los dispositivos construidos para comparar los valores de voltaje y corriente obtenidos en cada uno, usando esta herramienta computacional. De esta manera, fue posible identificar el comportamiento del voltaje obtenido en cada etapa de los prototipos, con el fin de optimizar la potencia de salida generada para una aplicación respectiva.

Es importante tener en cuenta que para hacer las simulaciones se tomaron variables de los diferentes prototipos una vez construidos, como el valor de campo magnético del imán, las dimensiones de la bobina, su valor de resistencia, inductancia y su área de trabajo.

El software de licencia libre OPENMODELICA fue seleccionado con el fin de simular los dispositivos de manera práctica por su entorno y herramientas enfocadas al mundo físico. Entre sus características más importantes por las que se decidió optar por este software, son su interfaz para realizar los diseños mediante creación de modelos mediante simbología y gráficos de los elementos utilizados para construir los prototipos físicamente (resistencias, capacitores, fuentes, etc.)<sup>61</sup>, además de un formato de texto para configurar dichos elementos con sus propiedades independientes en caso de ser necesario. También, ofrece una interfaz donde se puede observar el comportamiento de cada una de las variables descritas para el prototipo, permitiendo al usuario interactuar y obtener el análisis apropiado para comparar los resultados de los diseños propuestos.<sup>62</sup>

El análisis del dispositivo se dividió en dos partes, la primera enfocada a la captación de energía para generación de voltaje y corriente, para después realizar el análisis de la rectificación y regulación del voltaje obtenido anteriormente.

En las siguientes secciones se explica con detalle cada uno de los procesos realizados para el desarrollo de las simulaciones, a partir de las librerías que ofrece el software OPENMODELICA. En primera instancia, se realizaron diagramas de bloques para analizar la captación de energía del dispositivo mediante su modelo matemático. Lo siguiente fue realizar el circuito para la rectificación y regulación del voltaje obtenido en la captación de energía, para finalmente identificar, computacionalmente, los resultados obtenidos en los dispositivos construidos.

##### 4.1 CAPTACIÓN DE ENERGÍA

Mediante la función de transferencia desarrollada en el capítulo 2 (ecuación 2.20), se realizó el diagrama de bloques para obtener con precisión el comportamiento ideal del dispositivo en su captación de energía. El software OPENMODELICA tiene su menú de opciones para la realización de diagrama de bloques, similar a SIMULINK, permitiendo al usuario configurar cada parámetro y el método apropiado para la resolución de las ecuaciones desarrolladas.

---

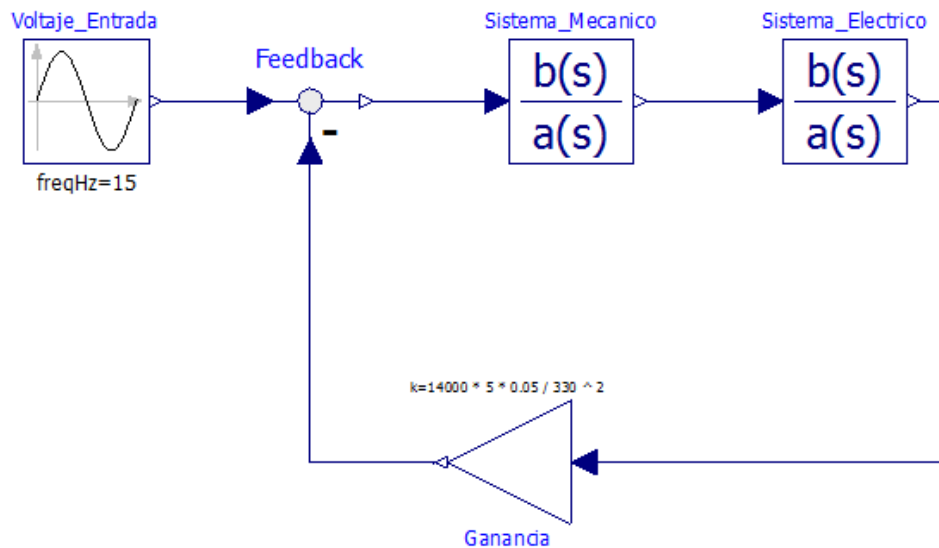
<sup>61</sup> Modelica, “ electrical analog ideal” , citado 04 en agosto de 2016

<sup>62</sup> Open Modelica , OpenModelica Connection editor, citado 04 en agosto de 2016

La librería para el desarrollo de diagrama de bloques que ofrece el programa, permite identificar las variaciones que se presentan dentro del dispositivo cuando se cambian los valores en sus características, tanto mecánicas como eléctricas. Con esta librería se realizó el análisis de la función de transferencia y así determinar las variables de voltaje y frecuencia que se utilizaran en la etapa de rectificación y regulación. Es importante mencionar que, para este software, no existe una librería que intervenga directamente con el ámbito de energías renovables, por lo que se optó por herramientas convencionales que ofrece para realizar los análisis para el proyecto descrito en este documento. Se encuentra en desarrollo una librería que trata de simplificar la simulación de almacenamiento de energía eléctrica en diversos dispositivos que trabajan a partir de energías renovables, pero aún no cuenta con la documentación respectiva<sup>63</sup>.

A continuación, se muestra el diagrama de bloques realizado.

*Figura 31. Diagrama de bloques en Open Modélica*



*Fuente: Propia del autor.*

Las ecuaciones del sistema mecánico y del sistema eléctrico fueron obtenidas mediante el despeje de la función de transferencia de todo el dispositivo (como se puede observar detalladamente en el capítulo anterior). Cabe resaltar que la entrada sinodal tiene un valor de amplitud equivalente al promedio aproximado de voltaje de 5V con respecto al tiempo generado por el prototipo, y una frecuencia de 15hz, ya que esta frecuencia permite que el movimiento interno del imán tenga una amplitud considerable y así generar un nivel de voltaje adecuado para la continuación de las etapas posteriores.

<sup>63</sup> HAUMER, Anton, Modelica energyStorages,2015, citado 10 en septiembre en 2016

En la siguiente tabla se muestran las variables eléctricas de cada uno de los dispositivos construidos. Para la parte mecánica, se mantuvieron las mismas variables para todos, puesto que se realizaron las pruebas con un único sistema masa resorte.

Estas variables se introdujeron en el respectivo diagrama de bloques, debido a que el programa cuenta con un método de inserción de datos determinado, mediante el cual el usuario debe tener en cuenta las unidades de antemano para que la resolución del sistema sea el correcto.

*Tabla 6. Variables eléctricas de los Prototipos*

	No Vueltas (n)	Resistencia ( $\Omega$ )	Inductancia (H)	Altura (m)
<b>Prototipo 1</b>	12000	6800	2.720	0.035
<b>Prototipo 2</b>	7000	5670	2.250	0.075
<b>Prototipo 3</b>	14000	5330	3.353	0.05

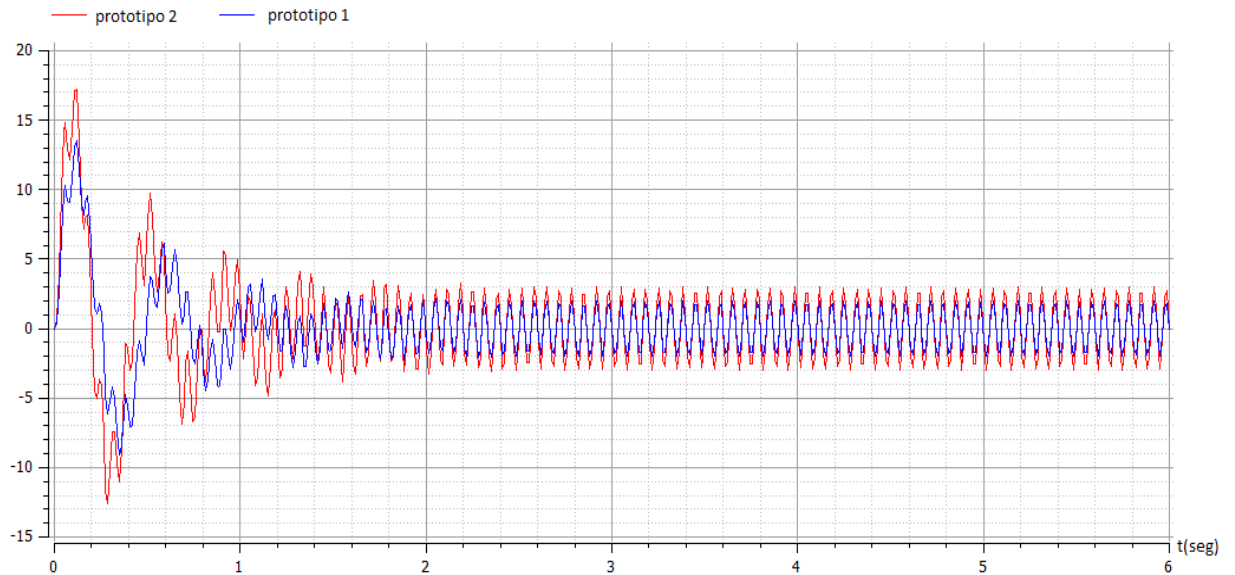
*Fuente: Propia del autor.*

Mediante la función para graficar del software, se obtuvo una visión general de todas las variables aplicadas en la función de transferencia. En la figura 32 se muestra el comportamiento de los dos primeros prototipos, que eran de estructura cuadrada.

Se realizó la comparación de voltaje para determinar cuál funcionaba mejor y cumplía con los requerimientos para la etapa siguiente (regulación). Para analizar correctamente estos comportamientos, se mantuvo el voltaje de entrada promedio, con valor de 5V y se variaron sus características eléctricas.



*Figura 32. Comparación de voltaje prototipos 1 y 2*



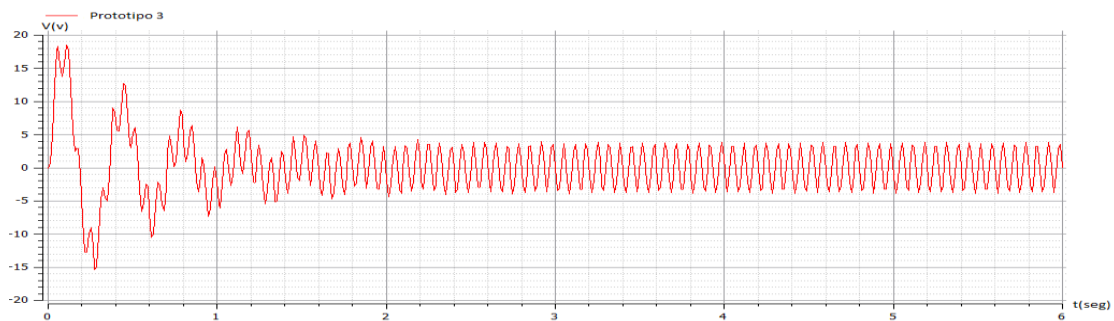
*Fuente: Propia del autor.*

En la figura 32 se puede observar que el dispositivo 2 genera picos mayores de voltaje con respecto al tiempo, con aproximadamente 1 V de diferencia en ellos. También, este prototipo tiene un tiempo de estabilización aproximado de 2,1 seg, menor que el primero, con aproximadamente 3 seg. Es importante resaltar que el número de espiras, interfiere en el resultado de manera inversa a la cantidad de estas; si es menor el número de estas, los picos de voltaje serán mayores, como lo muestra la figura. Caso contrario al área de distribución de la bobina, donde es directamente proporcional a la altura de la bobina, recordando su respectiva forma cuadrada.

Se realizó un tercer dispositivo cambiando su geometría debido a los resultados obtenidos, pasando de una bobina cuadrada a una circular, y esto permitió obtener niveles de voltaje mayores y un comportamiento del sistema subamortiguado, donde se mantiene un rango de voltaje adecuado para la alimentación del regulador, que debe ser mayor a los 3,3V de salida que este otorga.

La figura 33 muestra que se estabiliza haciendo una gráfica senoidal aproximada entre -4,8V y 4.8V, teniendo en cuenta que se debe mantener constante la frecuencia del dispositivo.

*Figura 33. valor del voltaje para el dispositivo final*



*Fuente: Propia del autor.*

La eficiencia del prototipo 3 se debe a varios factores. En primer lugar, la forma circular de la carcasa permite minimizar la distancia del imán con la bobina, generando un mayor campo magnético. Otra cuestión importante fue construir la bobina en el área donde el imán oscila el mayor valor de tiempo. Gracias a este diseño, se pudo maximizar el número de vueltas, sin necesidad de requerir una altura considerablemente mayor a la de los prototipos anteriores.

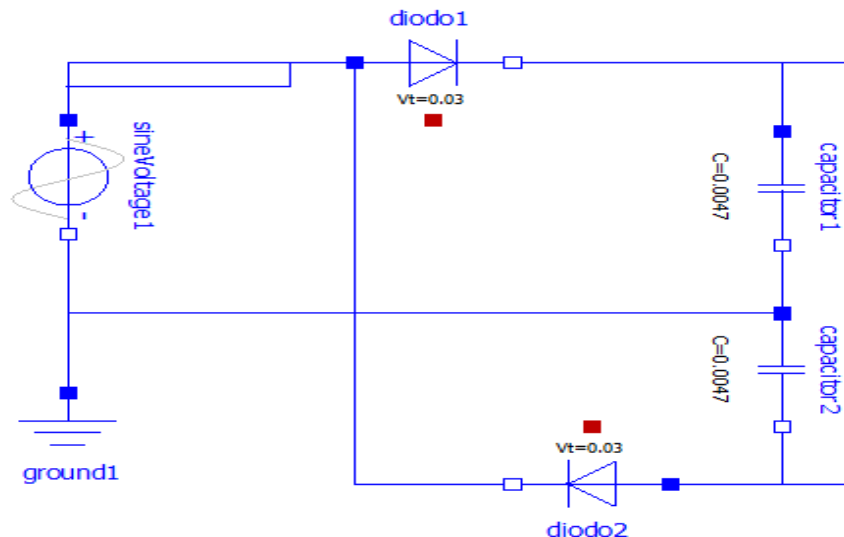
Una vez obtenido un voltaje variable senoidal en esta etapa, es necesario realizar la simulación de la rectificación con el fin de analizar el voltaje requerido en DC, y así, demostrar la funcionalidad de acuerdos a los objetivos descritos.

## 4.2 RECTIFICACIÓN Y REGULACIÓN DEL VOLTAJE

El tipo de regulación utilizado fue un duplicador de voltaje, ya que la magnitud de voltaje en la salida era mayor usando este método que con un rectificador de onda completa mediante un puente de diodos. En la figura 34 se observa el duplicador de voltaje implementado en el software. Se puede configurar los diodos para que tengan un comportamiento similar a los utilizados en el prototipo, debido a que su voltaje de trabajo debe ser de 0.3V.

Es importante mencionar que el funcionamiento continuo del regulador, depende del voltaje de entrada obtenido del duplicador de voltaje, por lo que los condensadores deben tener un alto valor de capacitancia. Entre mayor sea este valor, se podrá almacenar la totalidad de los picos de voltaje provenientes de la captación de energía, que se dan en intervalos de tiempo muy rápido, por lo que se usaron condensadores de 4700uF. Para este tipo de aplicaciones se busca implementar súper capacitores, con valor de capacitancia muy alto, de bajo voltaje y dimensiones reducidas. Sin embargo, estos componentes tienen un alto costo y su oferta es muy reducida.

Figura 34. Componentes eléctricos en Modélica.

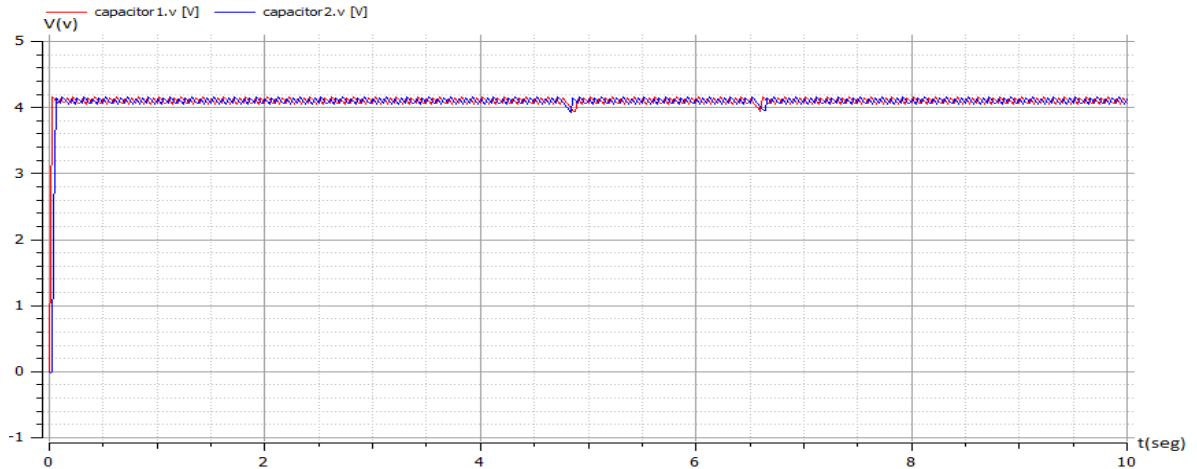


Fuente: Propia del autor.

El programa permite comprobar el valor de voltaje en cada uno de sus componentes, y de esta manera, evaluar el comportamiento general del circuito para ser implementado en físico posteriormente. A continuación, la figura 35 muestra el voltaje en cada capacitor. La grafica permite

identificar que cada capacitor mantiene un valor de voltaje similar un semiciclo de la entrada, permitiendo que la salida los sume y así obtener el respectivo voltaje duplicado.

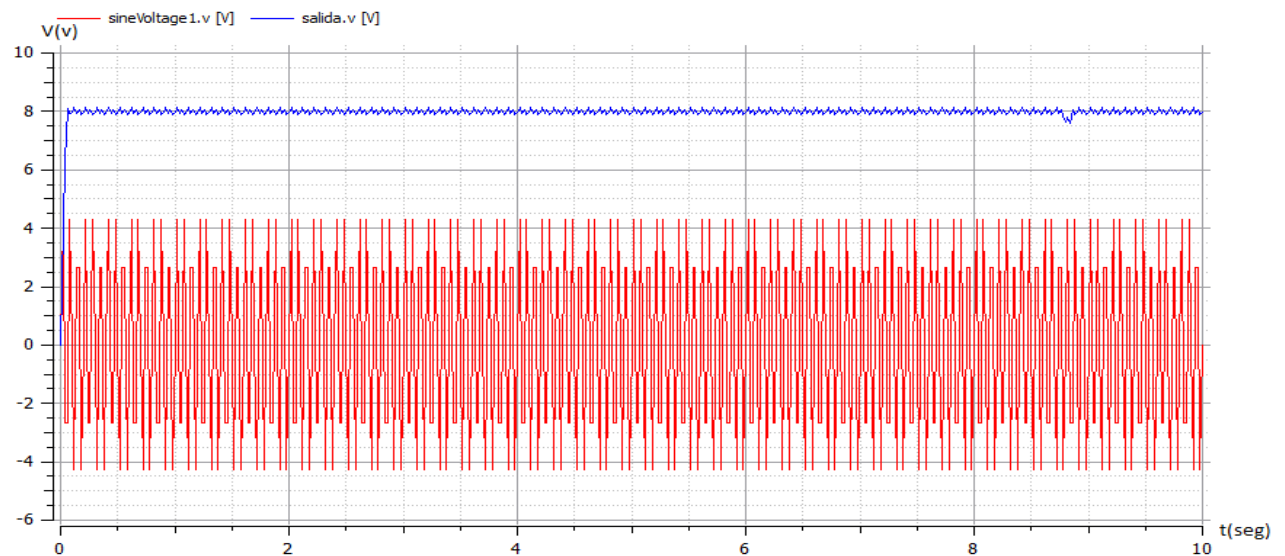
*Figura 35. Valor de voltaje para los dos capacitores*



*Fuente: Propia del autor.*

Cabe resaltar que el programa muestra un comportamiento ideal del dispositivo, donde el valor de voltaje de entrada es duplicado de manera aritmética. A diferencia del dispositivo, el método del duplicador de voltaje se aplicó para mantener un voltaje constante de entrada al regulador, ya que el cambio de frecuencias y la amplitud del desplazamiento del imán no permiten que el comportamiento sea totalmente homogéneo, como lo supone el software. La figura 36 muestra el cambio de voltaje de entrada-salida simulando el duplicador, donde se puede observar el voltaje entrada idealmente duplicado por el circuito

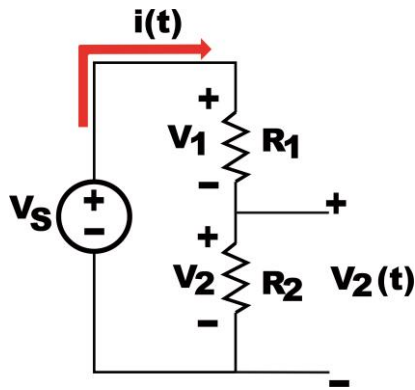
*Figura 36. voltaje de entrada vs voltaje de salida*



*Fuente: Propia del autor.*

Para la parte de regulación, se hizo un divisor de voltaje, como analogía para el comportamiento del regulador usado (1117 T). Como se conoce la salida de voltaje deseada y la resistencia de carga final de  $330 \Omega$ , se realizó el cálculo para obtener el valor de resistencia requerida para simular de manera apropiada el regulador.

Figura 37. Circuito regulador de voltaje y formulas



$$V_S(t) = V_1(t) + V_2(t) = i(t)(R_1 + R_2) \quad (3,1)$$

$$i(t) = \frac{V_S(t)}{R_1 + R_2}$$

$$V_2(t) = i(t)R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_S(t) \quad (3,2)$$

Por ley de voltajes de nodos

$$V_S = V_1 + V_2$$

Por ley de ohm

$$V_S = i(R_1 + R_2)$$

$$(R_1 + R_2) = \frac{R_2 V_S}{V_2} \quad (3,3)$$

$$R_1 = \left( \frac{R_2 V_S}{V_2} \right) - R_2$$

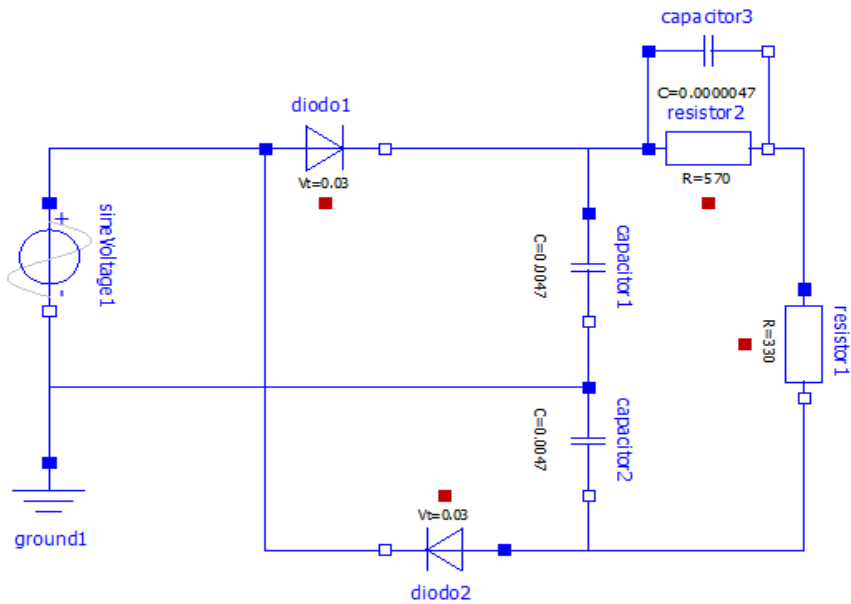
Remplazando por valores aproximados del circuito

$$R_1 = \left( \frac{330.9}{3.3} \right) - 330 = 570 \approx 560 \text{ a } 680 \Omega \quad (3,4)$$

Con estos elementos definidos, se realizó la simulación para establecer el voltaje de salida posible para nuestro dispositivo. También, el software permite evaluar la corriente que proporciona el dispositivo simulado y de esta manera garantizar una potencia aproximada para definir sus respectivas aplicaciones. La figura 38 muestra los resultados obtenidos (B para voltaje y C para corriente) a partir del circuito realizado (38.A)

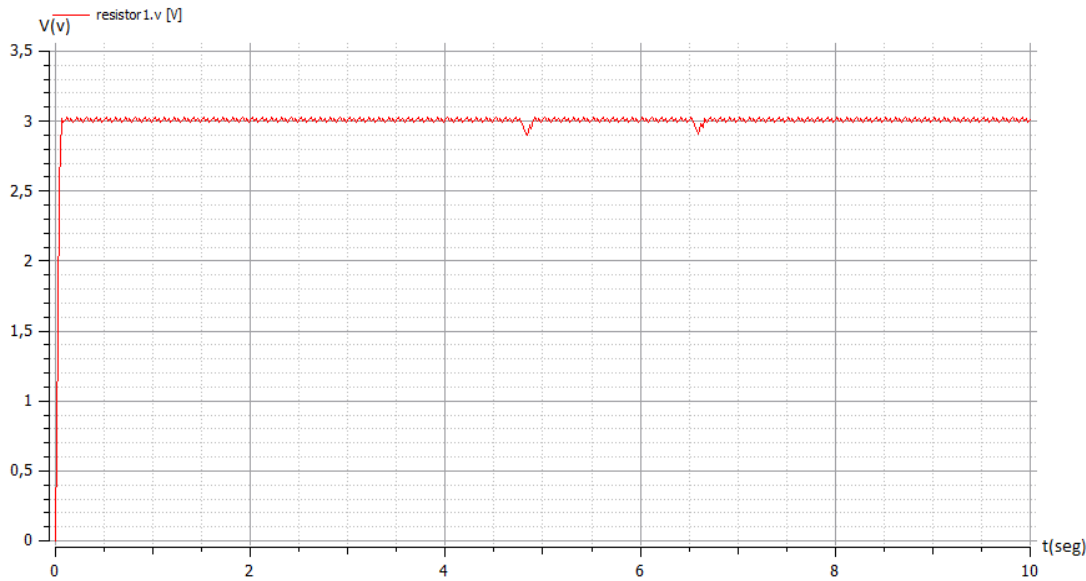
Figura 38. Circuito y variables de salida: (A)circuito completo, (B)grafica de voltaje, (C) grafica de corriente

(A)



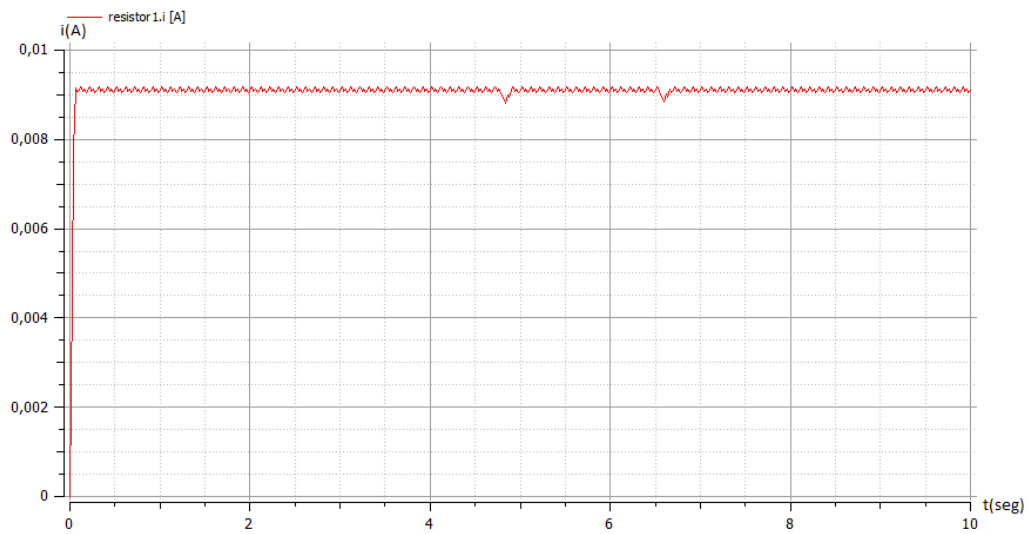
Fuente: Propia del autor.

(B)



Fuente: Propia del autor.

(C)

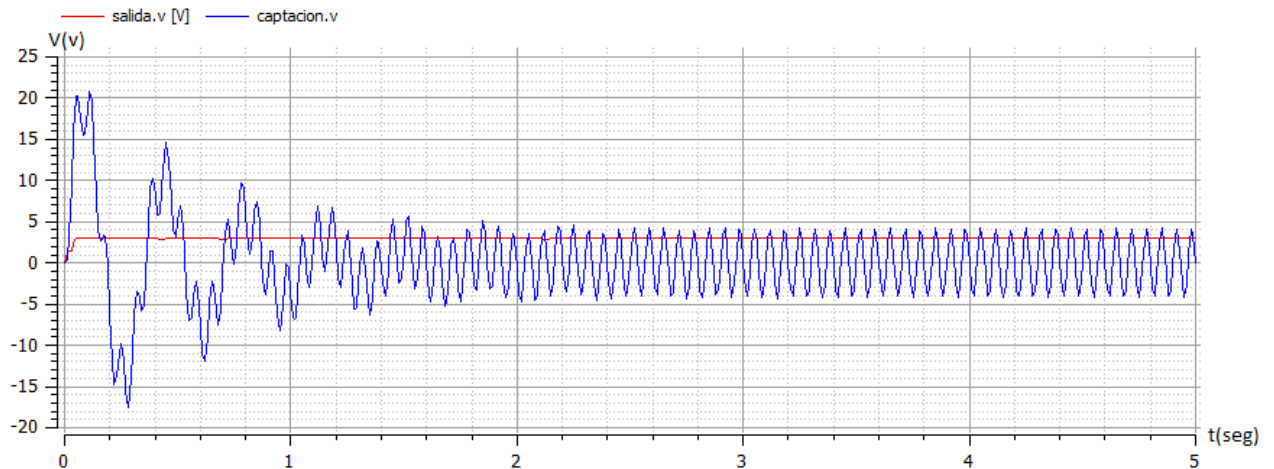


*Fuente: Propia del autor.*

La figura 39 describe el comportamiento de las dos partes desarrolladas anteriormente. La línea de color azul es el comportamiento del dispositivo en la parte de captación de energía, mientras que la línea roja es el valor de voltaje de salida final del dispositivo. Como se puede observar, existe una pérdida relevante en el pico de voltaje de salida debido a los componentes del duplicador del voltaje, aunque en su parte final se encuentra totalmente rectificado dando un comportamiento del voltaje constante en DC.

Es importante aclarar que este resultado es ideal, ya que el software determina un accionamiento constante y uniforme en el dispositivo.

*Figura 39. Voltaje Captación de energía vs voltaje de salida*



*Fuente: Propia del autor.*

Las simulaciones desarrolladas en este capítulo permitieron tener una aproximación y un punto de comparación para los resultados esperados en los prototipos físicos. Mediante el software, fue

posible realizar un estudio de la evolución en la señal de voltaje para obtener finalmente un valor de salida final acondicionado para ser utilizado como fuente de alimentación.

Gracias a las librerías que ofrece el software, se implementaron las simulaciones para las diferentes etapas que corresponden al análisis de los prototipos, así como una comparación de su comportamiento en un entorno ideal, aplicando sus características básicas.

Finalmente, el estudio de estos prototipos de manera computacional, permite evaluar con detalle cada uno de los parámetros descritos para cada dispositivo. Como fue observado, se pudo evidenciar que el comportamiento del voltaje era mejor en una geometría circular, únicamente con las especificaciones del prototipo, sin necesidad de realizar un diseño en un software especial o de necesitar una librería enfocada a este tipo de captadores de energía.

## 5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

Para comprobar la funcionalidad de cada uno de los prototipos, se realizaron diversas pruebas con el fin de analizar y definir aplicaciones futuras. Gracias a herramientas que ofrece la universidad, se realizaron las pruebas mediante un generador de vibraciones<sup>64</sup> que permitía conocer la frecuencia y la amplitud de dichas vibraciones. De esta manera, los resultados obtenidos fueron más precisos para ser comparados posteriormente. En la figura 40 se observa el generador de vibraciones junto a los prototipos para las pruebas mencionadas.

*Figura 40. Generador de vibraciones acoplado a dispositivos*



*Fuente: Propia del autor*

### 5.1 PRUEBAS DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA

Con el prototipo 1 se realizaron pruebas, aplicando movimiento humano, para determinar el valor máximo de voltaje que podría alcanzar, aplicando una fuerza considerable. El resultado de dichas pruebas mostró aproximadamente 8 vpp. Sin embargo, en la figura 41 se observa una gráfica que, a pesar de generar una señal periódica, muestra constantes irregularidades en los picos de voltaje, que oscilan entre 4 y 6 voltios A.C. En experimentos posteriores se evidenció que este tipo de fenómenos afectan la rectificación, ya que es necesario obtener una señal sinodal más estable en la parte de captación.

Es importante mencionar que, debido a el área reducida de la bobina, el imán rozaba las espiras y con el tiempo fracturo el cable en varios sectores de esta. Como consecuencia, no generaba voltaje

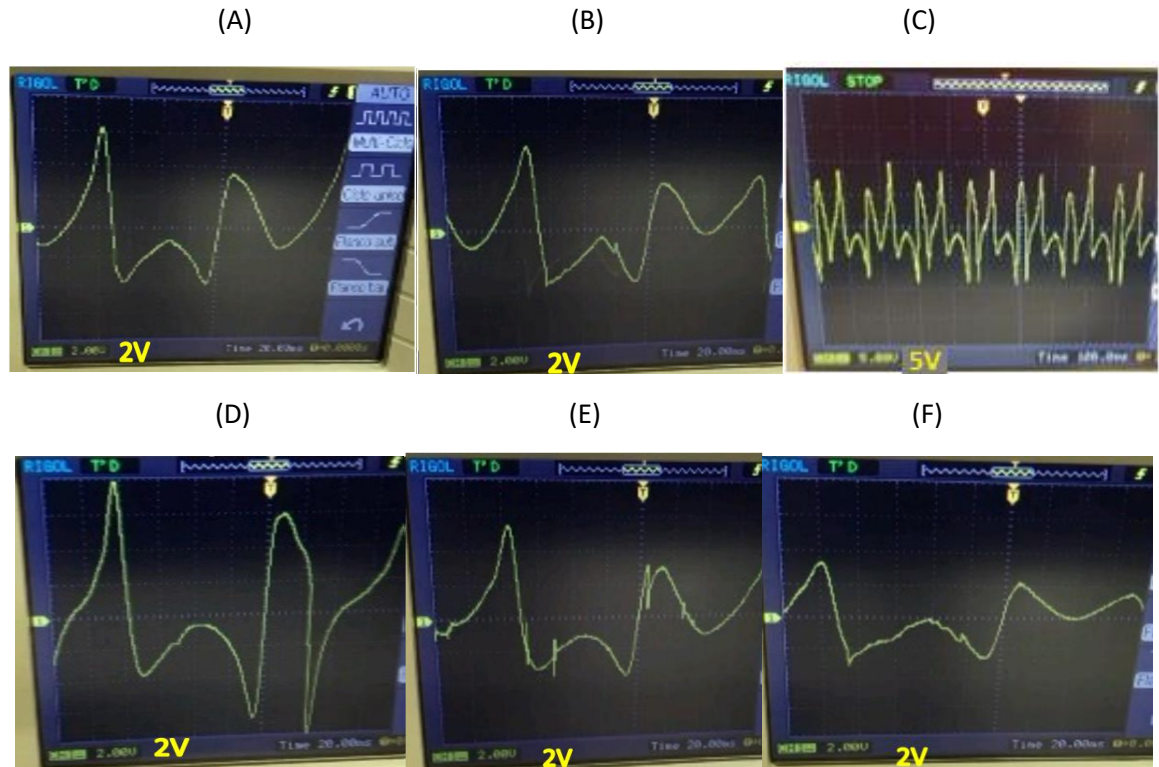
---

<sup>64</sup> FREDERIKSEN, Søren, Instruction Manual for the Vibration Generator no. 2185.00, 19-07-14, 1p.



de salida al momento de llevar a cabo pruebas en el generador de vibraciones. Se decidió realizar el segundo prototipo con un área mayor para que el imán se moviera libremente, manteniendo la forma cuadrada de la bobina.

*Figura 41. Voltaje alterno primer dispositivo. (A)5Hz, (B)6Hz, (C)9Hz, (D)15Hz, (E)17Hz, (F)23Hz*

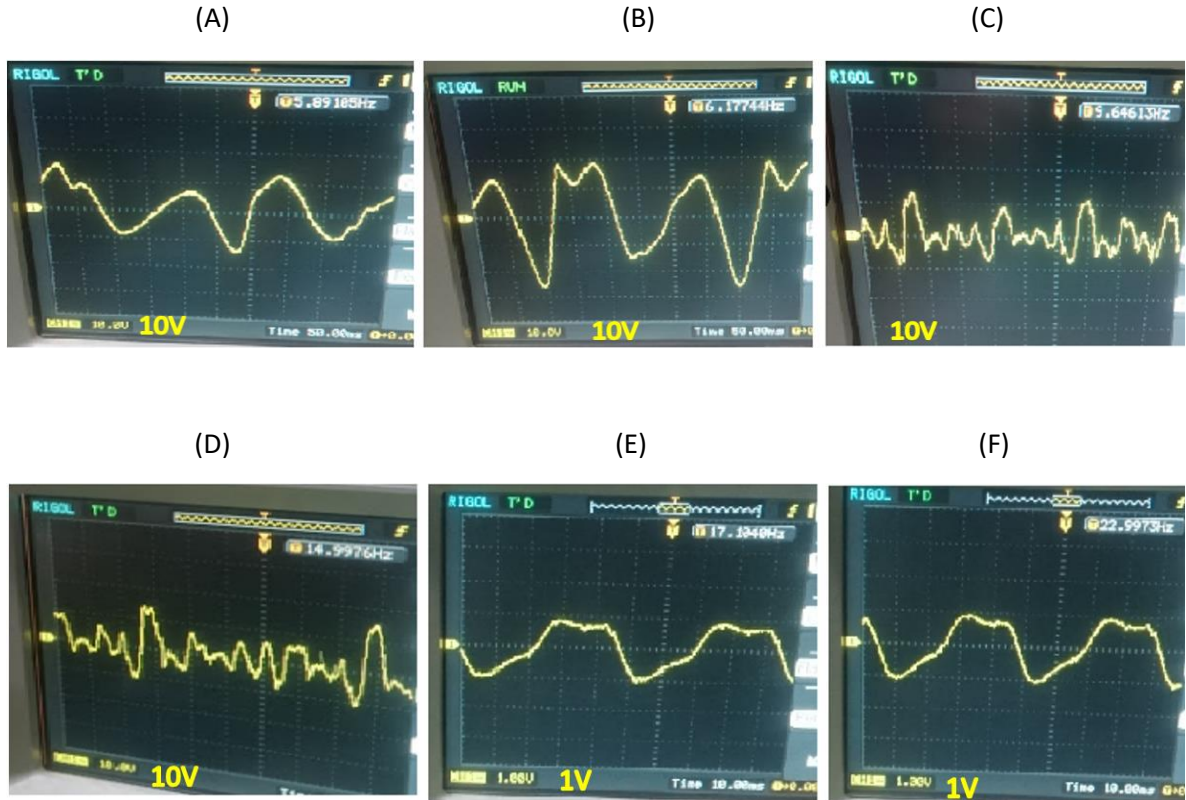


*Fuente: Propia del autor.*

Para el segundo prototipo, se acopló el generador de vibraciones mencionado anteriormente en la base para simular ambientes vibratorios externos. La ventaja que ofrece este generador es mantener un ambiente controlado con variables precisas y obtener las comparaciones correctas entre los prototipos, ya que la diferencia entre ellos son sus características propias de diseño.

En la figura 42 se muestra los cambios de voltaje, generados en diferentes niveles de frecuencia. Cabe resaltar que estas pruebas se realizaron con la mayor amplitud que ofrece el generador, para maximizar los resultados obtenidos en el prototipo.

Figura 42. Voltaje Captación de energía para segundo prototipo. (A)5Hz, (B)6Hz, (C)9Hz, (D)15Hz, (E)17Hz, (F)23Hz

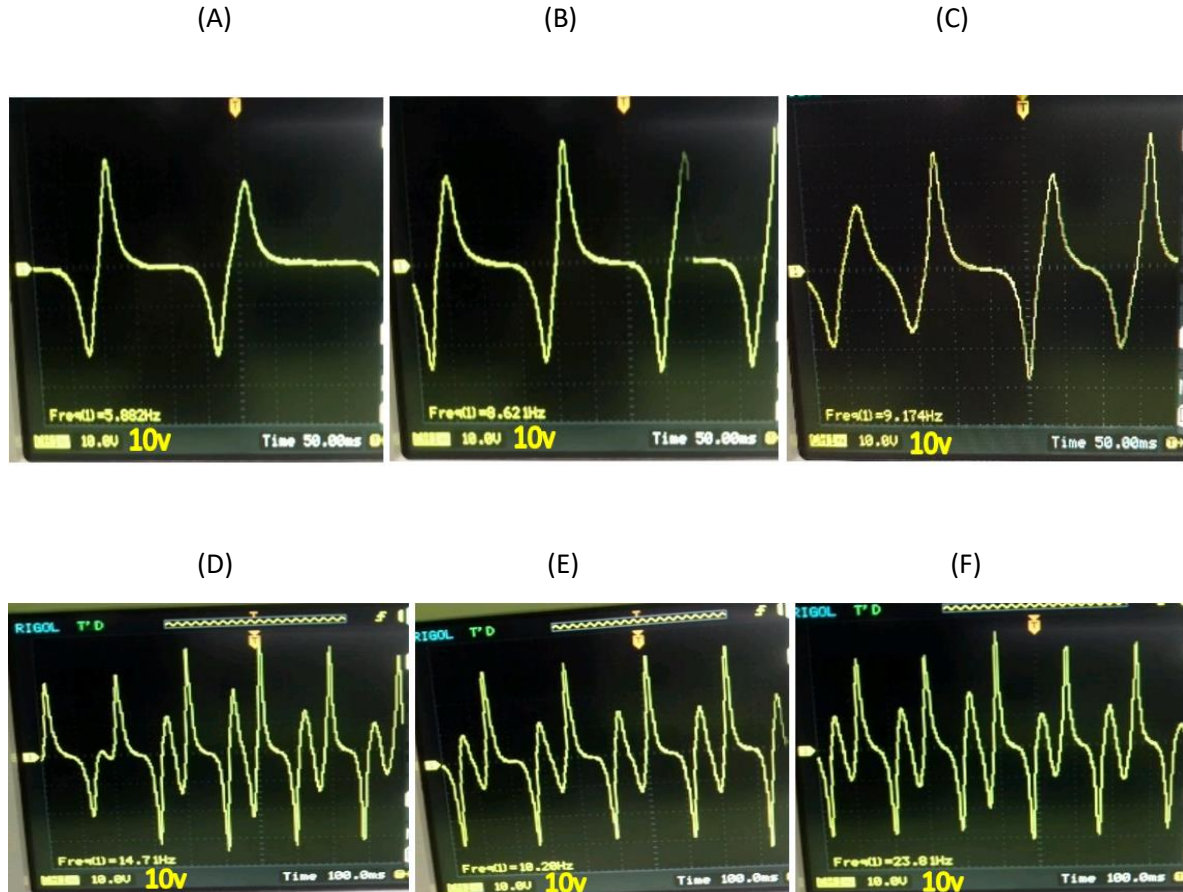


Fuente: Propia del autor.

Como lo muestran las imágenes, se realizaron pruebas para frecuencias aproximadas de 5, 6, 9, 15, 17 y 23 Hz, respectivamente. En todas estas pruebas, se observa cómo el movimiento del imán, a través de toda el área de la bobina, genera un voltaje variable que va disminuyendo a medida que la frecuencia aumenta. Para los valores de frecuencia bajos, el voltaje producido es mayor en sus picos debido a que el generador permite al imán tener un mayor recorrido. A diferencia del dispositivo anterior, los semiciclos se ven con más claridad, pero igual se mantiene la irregularidad que evita el desarrollo apropiado de una futura rectificación. Para la frecuencia de 5 Hz, se obtuvo un valor de voltaje entre 11 a 12 vpp, mientras que, para la frecuencia de 23 Hz, el voltaje es aproximadamente 1 vpp.

Para obtener una señal que fuera adecuada para rectificar, el tercer prototipo fue realizado con geometría circular, mostrando resultados significativamente mejores a los obtenidos en los prototipos anteriores. En la figura 43 se observa el cambio de voltajes respecto a la variación de frecuencias. Como se ha precisado anteriormente, el generador de vibraciones permitió realizar las pruebas en las mismas condiciones externas al prototipo, y así, demostrar que esta geometría es la más apropiada para el diseño del captador propuesto, es probable que esta sea la razón por la que la mayoría de los diseños en el mercado sean circulares.

Figura 43. Voltaje Captación de energía para tercer prototipo. (A)5Hz, (B)6Hz, (C)9Hz, (D)15Hz, (E)17Hz, (F)23Hz



Fuente: Propia del autor.

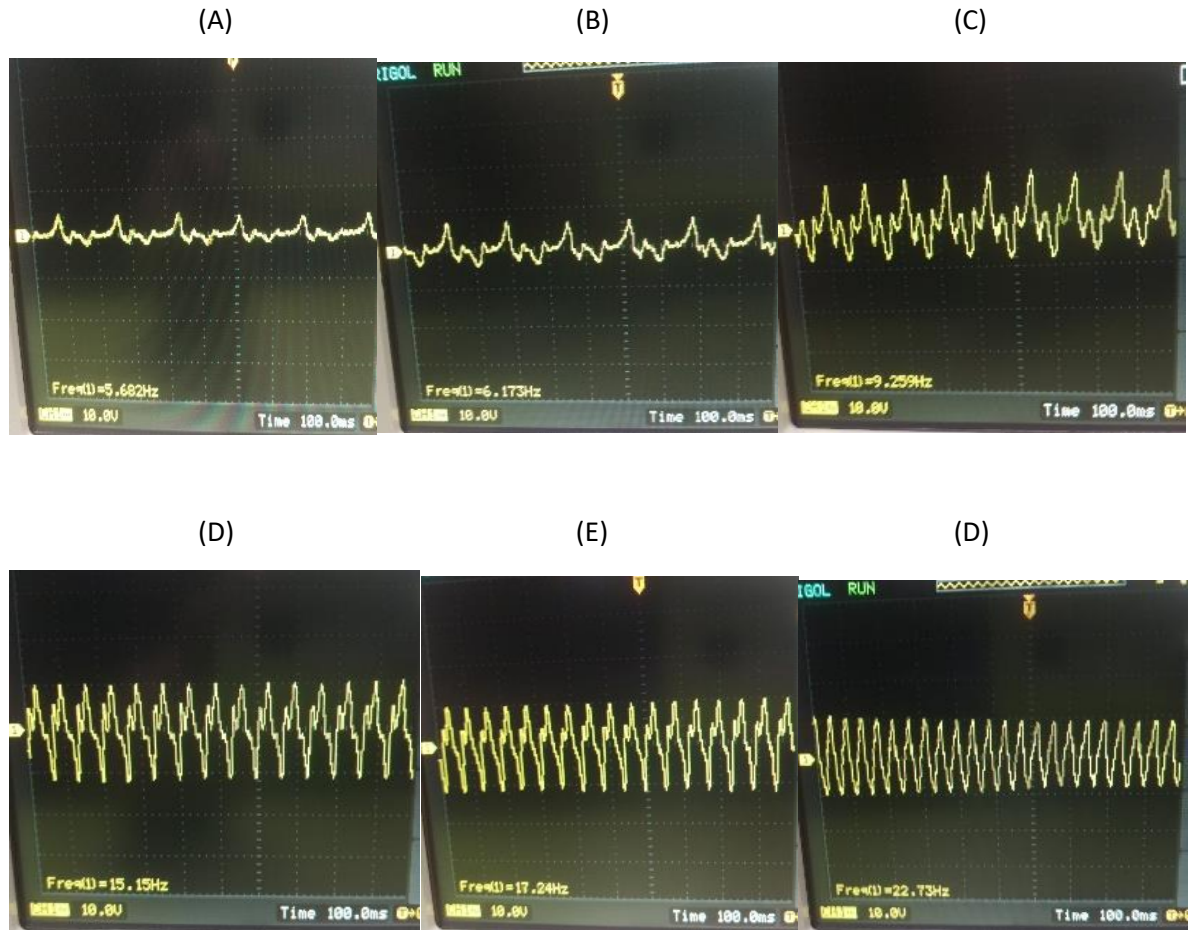
Los resultados obtenidos por el tercer prototipo usando el generador de vibraciones fueron los adecuados para proceder a la siguiente etapa de rectificación. Sin embargo, debido a que dentro de la simulación los valores de voltaje no eran tan altos (capítulo 3), se procedió a probar este prototipo de manera manual, con el fin de determinar si los datos mostrados a partir del generador de vibraciones eran adecuados para implementar aplicaciones de mayor potencia a la establecida por diversos autores<sup>65</sup>.

En la figura 44 se muestra la secuencia de graficas de voltaje generadas a partir de frecuencias similares a las implementadas anteriormente, de manera manual. Así, se comprobó que los valores resultantes del generador de vibraciones eran ideales, debido a la constante amplitud y frecuencia dada por dicho generador. Es importante aclarar que, aunque el valor de voltaje de la captación de

<sup>65</sup> SPREEMAN,Dirk,MANOLI,Yiannos. Electromagnetic vibration energy harvesting devices: Springer,2012,10 p.

energía por excitación manual no era tan alto como por el obtenido en el ambiente controlado, era suficiente para cumplir con los objetivos descritos.

*Figura 44. Voltaje Captación de energía manual para tercer prototipo. (A)5Hz, (B)6Hz, (C)9Hz, (D)15Hz, (E)17Hz, (F)23Hz*



*Fuente: Propia del autor.*

Las diferentes imágenes muestran que, para el movimiento humano, hay una considerable disminución en los picos de voltaje de la captación, como los observados en la figura 5. Es importante mencionar que la onda generada que se adecua a ser rectificada, por su forma parcialmente sinodal, está dada para la frecuencia de 23 Hz. Adicionalmente, la evolución de la señal es afectada por el tiempo de trabajo del prototipo, porque los picos de voltaje se mantienen iguales después de un valor de tiempo determinado, que para las simulaciones es inferior a 5 seg, pero para el dispositivo físico es mayor, debido a las condiciones externas no ideales, y por el rozamiento en el sistema masa resorte que, a pesar de ser mínimo, genera una discontinuidad en la fluidez del movimiento. Esto se puede evidenciar con claridad en las figuras 6.D y 6.F, donde la señal es periódica, se mantiene los picos de voltaje constantes cercanos a 20v, pero con una desviación en los semiciclos positivos.



Los resultados de las pruebas realizadas con los prototipos se muestran en la tabla 1. Es evidente que el prototipo 3 obtuvo el mejor desempeño, tanto en la implementación manual, como en el estudio realizado con el generador de vibraciones. A diferencia de los prototipos cuadrados, los picos de voltaje aumentan su amplitud a medida que la frecuencia aumenta a los valores de frecuencias utilizadas en las pruebas, puesto que estos llegaban a su funcionalidad máxima en un valor promedio de 15Hz.

*Tabla 7. Cuadro comparativo de las pruebas realizadas a los 3 dispositivos*

	Voltaje A.C (Vmax)			
	Prototipo 1	Prototipo 2	prototipo 3	
Frecuencia(Hz)	Manual	Generador	Generador	Manual
5	6,2	14	19	5
7	6,4	18	26	7
9	9,8	12	28	10
15	7,8	14	28	10,2
17	5,4	0,8	26	10,2
23	3,6	0,8	30	9,8

*Fuente: Propia del autor.*

## 5.2 RECTIFICACIÓN Y REGULACIÓN

Una vez obtenido los valores de voltaje continuos y constantes, se realizó la rectificación y regulación para la captación de energía, para obtener un modelo funcional completo.

Para el primer prototipo, se acoplo un puente de diodos de germanio con la intención de obtener una señal de salida estable. Aunque se logró obtener una señal totalmente rectificada en el semiciclo positivo, como se observa en la figura 45, no se generó valores mayores a 3 vpp, con variaciones que oscilan entre 500 mvpp y 1 vpp. Adicionalmente, el rectificador no recibe un valor considerable de voltaje del prototipo. Este efecto se atribuye a bajos niveles de voltaje en el captador, debido a las características de diseño mostradas en el capítulo anterior.

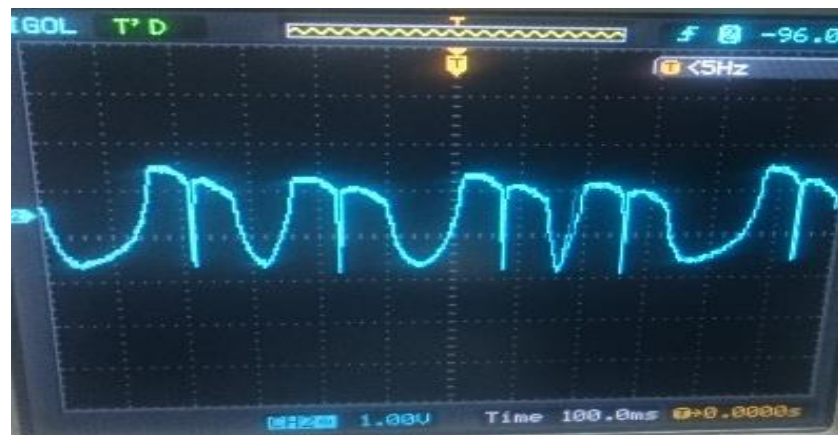
*Figura 45. Rectificación primer prototipo*



*Fuente: Propia del autor.*

Para el prototipo se final se acoplo el circuito rectificador de diodos para comprobar su funcionamiento y el voltaje que ofrecía para esta etapa. En la figura 46 se muestra el comportamiento de voltaje para este dispositivo. Se puede observar que el rectificador funciona correctamente, pero los picos de voltaje de salida eran bajos, no superando 2vpp. Por esta razón se decidió implementar el duplicador de voltaje.

*Figura 46. Rectificación para prototipo final con puente de diodos*



*Fuente: Propia del autor*

La figura 47 muestra el comportamiento del prototipo utilizando el duplicador de voltaje, donde se realizó la comparación de la señal de voltaje de la parte de captación, con la salida del rectificador. Para esta prueba, se puede observar un aumento en los picos de voltaje, con valor de aproximadamente 8vpp. Sin embargo, la señal periódica muestra un pico de voltaje intermedio inferior a 2 vpp, y también, picos en el semiciclo negativo cercanos igualmente a 2vpp que, a pesar de ser una reducción considerable, no se ve afectado el funcionamiento del sistema debido a la rapidez de la señal con respecto al tiempo, de 200ms entre cada pico de voltaje.

Figura 47. Comparación de señal de voltaje Captación vs rectificación



Fuente: Propia del autor

Para mantener y almacenar el voltaje adecuado para alimentar el regulador, se utilizaron condensadores de 4700  $\mu\text{F}$  en el duplicador de voltaje. Esto permitió que la salida del duplicador tuviera un voltaje rizado inferior a 1vpp, como se observa en la figura 48. De esta manera, se comprobó que esta configuración de rectificación, ofreció un resultado adecuado para implementar un regulador para una salida final de aproximadamente 3v.

Figura 48. Voltaje rizado



Fuente: Propia del autor.

Finalmente, se realizaron pruebas de funcionamiento del dispositivo con el circuito completo. A continuación, se muestra una tabla con los valores de voltaje obtenidos en frecuencias similares a las que fueron utilizadas para las pruebas anteriores.

*Tabla 8. Voltajes de salida vs frecuencias de prototipo final*

Frecuencia (Hz)	Voltaje (V)
5,74	0,56
6,20	0,89
9,01	2,65
15,55	3,90
17,11	4,02
23,30	4,22

*Fuente: Propia del autor.*

Es importante mencionar que, con el fin de obtener los resultados verídicos, para cada prueba realizada, se realizó la carga de la captación de energía en cada una de las frecuencias, esperando un tiempo entre cada una de estas para que los condensadores se descargaran totalmente, y así obtener los valores indicados de voltaje. Si el voltaje se mantuviera constante en 4,22v, podría ser funcional para aplicaciones que requieran bajos niveles de corriente, como tarjetas de programación. Sin embargo, este valor es alto debido a que no se tiene conectada ninguna carga, por ende, los condensadores se mantienen cargados en este rango de voltaje. Manteniendo un voltaje aproximado de 3v, podría obtenerse una potencia alrededor de 30Mw, que puede ser aplicada en dispositivos que no requieran un nivel de corriente considerable, ya que el valor máximo de corriente medido fue de 10 mA.



## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

### 6.1 CONCLUSIONES

Se realizó el respectivo modelo matemático teniendo en cuenta las variables para la captación de energía, el movimiento mecánico y la potencia generada para la implementación de los prototipos.

Se realizaron diseños estructurales para la construcción de la bobina y posteriormente para el prototipo de captación de energía. A partir de 3 prototipos construidos, se realizaron estudios para determinar cual obtuvo la mayor generación de voltaje.

Mediante el software OPENMODELICA, se desarrollaron las simulaciones para el análisis de las variables mecánicas y eléctricas, obtenidas a partir de la construcción de los prototipos, y se realizaron las comparaciones de los resultados obtenidos computacionalmente, comprobando el comportamiento de los prototipos físicos.

Con un generador de vibraciones se realizaron estudios de funcionamiento para los prototipos construidos, analizando su comportamiento frente a diferentes frecuencias para obtener los diferentes valores de voltaje y realizar un comparativo entre estos.

El prototipo que obtuvo el mayor nivel de voltaje fue el que se construyó con una geometría circular. Esto permitió comprobar que los dispositivos de captación de energía que se encuentran en el mercado actual tienen esta forma, a pesar de ser más pequeños en comparación a las dimensiones del prototipo realizado. A diferencia de estos dispositivos, con voltajes de salida entre 3,6v y 5v, el prototipo final generó alrededor de 3v, produciendo una potencia aproximada de 30mW.

Debido a las rupturas presentadas en las espiras de los primeros dos dispositivos, se realizó una estructura externa para proteger la bobina en el tercer dispositivo, evitando que este factor afecte a vida útil del prototipo. De igual forma, se construyó la bobina alrededor de un tubo de acrílico para que no tuviera contacto directo con el imán y prevenir una ruptura por el contacto de estos elementos.

Realizar el vástago del sistema masa resorte en nylon fue muy eficiente para evitar el rozamiento con el buje de bronce, ya que, por sus características, presenta versatilidad en este tipo de aplicaciones sin generar desgaste en su superficie, sin necesidad de utilizar sustancias que afectaran el sistema masa resorte, como grasas o aceites.

Las simulaciones realizadas en OPENMODELICA mostraron valores cercanos a los obtenidos en los prototipos físicos. Sin embargo, se podría optimizar y hacer más verídicos los resultados si se tuvieran en cuenta la totalidad de variables que afectan a el desarrollo de la captación de energía, como la fricción, la desviación del vástago, la variación de la frecuencia con respecto al tiempo, entre otros.

La precisión para controlar la frecuencia y la amplitud con el generador de vibraciones en las pruebas de los prototipos, permitió realizar una comparación más exacta frente a los resultados obtenidos, definiendo rangos de frecuencia fijos y realizar el estudio de los valores de voltaje obtenido a partir de las mismas condiciones para cada uno de los estos. También, permitió analizar el comportamiento de los prototipos frente a un ambiente controlado, y con inducción de captación de energía mediante movimiento humano, mostrando una disminución considerable para este último.

## 6.2 TRABAJOS FUTUROS

Para el desarrollo de este proyecto se tuvieron en cuenta una gran cantidad de variables que pueden modificarse con el fin de mejorar y optimizar los resultados obtenidos. Sin embargo, se generó un nuevo punto comparación para la realización de estudios sobre el aprovechamiento de la energía que produce las vibraciones en nuestro entorno.

Durante la realización del prototipo final, se comprobó que se podía aprovechar la energía producida por vibraciones frente a diferentes ambientes. Uno de los más importantes es el aprovechamiento del movimiento humano, que permite ajustar el prototipo a diversos ejercicios y maneras de transmitir esta energía, dando una versatilidad a la ubicación de este a pesar de su tamaño considerable.

Debido a que la construcción de los prototipos tenía una finalidad específica de ser funcionales sin contar con su apariencia, se puede disminuir su tamaño reduciendo el diámetro de la bobina considerablemente, y aumentando el número de capas de embobinado. También, es posible hacer cambios en la estructura externa del dispositivo, disminuyendo proporcionalmente el radio de la circunferencia interna del cilindro que contiene a la bobina, con respecto al tamaño del imán.

Para mejorar la captación de energía, se pueden utilizar imanes de mayor calidad y tamaño, que tengan un mayor valor de Teslas (T) para poder generar un campo magnético que permita a la bobina almacenar una mayor cantidad de corriente. Adicionalmente, se puede cambiar el calibre del alambre ya que se trabajó con un valor muy grande respecto a los utilizados en otros dispositivos, por su baja rotación en el mercado, evitando generar un valor mayor de corriente.

El sistema masa resorte podría mejorar el comportamiento general del sistema con resortes para esta aplicación específica, de poco desgaste a la elongación y de un material que tenga un valor de magnetismo nulo. Complementando este cambio, se podría disminuir el recorrido del imán minimizando la distancia entre el buje guía y la bobina, teniendo una amplitud constante en el tiempo con una mayor frecuencia, obteniendo un mayor valor de voltaje.

Para la calidad del material utilizado dentro del buje y el vástago se puede realizar un estudio a detalle de diversos materiales no magnéticos con el fin de minimizar el coeficiente de fricción dentro del sistema masa resorte, permitiendo un movimiento fluido sin afectaciones mecánicas.

Aunque el dispositivo está enfocado en bajas frecuencias, cabe resaltar que se puede aprovechar para diversas aplicaciones de uso cotidiano como una linterna, un cargador de baterías u otros medios donde la vibración este presente y pueda ser usada como un medio alternativo donde no sea necesario interferir en las características del entorno para que éste funcione. Aumentar el valor de corriente para estas aplicaciones podría darse mediante la unificación de varios dispositivos como los planteados en este documento, configurados en paralelo o en serie para obtener valores deseados.

Mediante el software OPENMODELICA se podrían implementar mejores opciones de diseño creando librerías para la conversión de energía mecánica en eléctrica, ya que solo cuenta con la herramienta EMF (generadores de energía electromotriz), proceso inverso a lo requerido para estos captadores de energía, así como una función que permita diseñar la parte de regulación, semejante a los reguladores físicos. También, existe la opción de desarrollar una librería general para captadores de

energía que permitan al usuario determinar el tipo de energía almacenada y las variables respectivas a éstas.

## 7. REFERENCIAS

---

- ÅKESSON, EKMAN, and HEDIN. Implementation of a Modelica compiler using JastAdd attribute grammars, *Sci. Comput. Program.*, vol. 75, no. 1–2, pp. 21–38, enero. 2010.
- ALGHISI, DALOLA, et al. “Ball-impact” Piezoelectric Converter for Multi-degree-of-freedom Energy Harvesting from Broadband Low-frequency Vibrations in Autonomous Sensors, vol. 87, pp. 1529–1532, 2014.
- ALL DATASHEET. Low drop fixed and adjustable positive voltage regulators [en línea], 2016, [citado 12 en noviembre de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=LOW%20DROP%20FIXED%20AND%20ADJUSTABLE%20POSITIVE%20VOLTAGE%20REGULATORS>>.
- ANACAFE. Hidrogeneración: la generación en Guatemala [en línea]. abril 19, 2012, [citado 4 jun.,2015]. Disponible en internet: <[https://www.anacafe.org/glifos/index.php?title=05ENER:Energia\\_hidrogeneracion#](https://www.anacafe.org/glifos/index.php?title=05ENER:Energia_hidrogeneracion#)>.
- APARICIO, NORDLANDER, DAHLQUIST. Modelling and Simulating Energy Conversion Processes using Modelica. Department of Energy Technology, Mälardalen University, 2012.
- BOISSEAU, DESPESE, and SEDDIK. Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting, *Small-Scale Energy Harvest.*, pp. 1–39, 2012.
- KWON, Park, and LAW. Electromagnetic energy harvester with repulsively stacked multilayer magnets for low frequency vibrations, *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, p. 55007, 2013.
- SANCHEZ. Desarrollo y medio ambiente: una mirada a Colombia, economía y desarrollo, pp. 80-86, 2002.
- C.I.P ETI TUDELA. Electrotecnia por ordenador: Magnetismo, capítulo 3, pag 2. 2004
- CARPIO. VHDL Lenguaje para descripción y modelado de circuitos, Universidad de Valencia, pp 9-11, octubre de 1997.
- CASTRO. Hacia una matriz energética diversificada en Ecuador, CEDA, pag 9, noviembre 2011.
- CAZORLA. Control de maqueta de levitación magnética utilizando un microcontrolador. Proyecto fin de carrera de Ingeniería de Telecomunicaciones, Cartagena, Escuela técnica superior de ingeniería de telecomunicaciones, 2011. 128p.
- CHALLA, PRASAD et al. A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tunability, *Smart Mater. Struct.*, vol. 17, p. 015035, 2008.
- COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto número 2143. (4, noviembre, 2015). Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo 111 de la Ley 1715 de 2014. Bogotá D.C. 2015. P 1-8.
- DE CALDAS, U. D. F. J. Diseño y fabricación de un prototipo de un moto-generador magnético [en línea], 10 julio 2012, p. 1-20, [citado 15 en diciembre en 2016] Disponible versión HTML en: <[http://www.cps.unizar.es/~transp/Ferrocarriles/ANEXO\(El\\_tren\\_de\\_levitacion\\_magnetica\).html](http://www.cps.unizar.es/~transp/Ferrocarriles/ANEXO(El_tren_de_levitacion_magnetica).html)>

DIGIKEY, harvested RF Powers Remote sensors [en línea], 2011, [citado 15 en diciembre de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/dec/harvested-rf-powers-remote-sensors>>.

DIYANA, MUTHALIF, et al. Vibration Energy Harvesting using Single and Comb-shaped Piezoelectric Beam Structures: Modeling and Simulation, vol. 41, pp. 1228–1234, 2012

EUROPEAN EDITORS. Nuevas tecnologías para recolección de energía [en línea], 2014, [citado en 04 de diciembre de 2016]. Disponible en internet: <http://www.digikey.com/es/articles/techzone/2014/jul/new-energy-harvesting-technologies>.

EXPOSITO. Campo magnético, Platea [en línea], 2006, [citado 15 en diciembre de 2016]. Disponible en internet: <<http://platea.pntic.mec.es/~pruiz/tercerciclo/votonatural/campomagne.htm>>.

FANG, LIU, et al. Fabrication and performance of MEMS-based piezoelectric power generator for vibration energy harvesting Microelectronics J., vol. 37, no. 11, pp. 1280–1284, nov. 2006.

FERRO SOLUTIONS. Energy harvesting, “vibration energy harvestar from ferro solutions” [en línea], abril, 2010, [citado en 03 de junio de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.sensorsmag.com/product/vibration-energy-harvester-ferro-solutions>>.

FLEXOUS. Hipper D.: High Performance Energy Harvester [en línea], junio 2016, [citado 03 en julio de 2016]. Disponible en internet: <<http://kinergizer.com/energy-harvesting-products/>>.

FREDERIKSEN. Instruction Manual for the Vibration Generator no. 2185.00, julio 2014.

GONZ. Almacenamiento de Energía Magnética Por Superconducción, abril 2013, pp.29–32.

GONZALEZ, VALENCIA. Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia, resumen enecutivo, UPMe, Bogota D.C, 2015. ISBN No. 978-958-8363-26-4.

HAUMER. Modelica energy Storages [en línea], 2015, [citado 10 en septiembre en 2016]. Disponible en internet: <[https://github.com/modelica/Modelica\\_EnergyStorages](https://github.com/modelica/Modelica_EnergyStorages)>.

HOFFMANN, HORST. Dynamic optimization of energy supply systems with modelica models. Energy saving control in plants and buildings, 2006.

HYPERPHYSICS. Conceptos sobre campo magnético: campo magnético [en línea]. Textinfo [Georgia State university], HYPERPHYSICS, noviembre 15, 2009, [citado 5 jun.,2015]. Disponible internet: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/magfie.html#c1>>.

KAZMIERSKI, BEEBY. Energy harvesting systems. Springer, 2011, 82 p. ISBN 978-1-4419-7565-2.

KOFMAN. Introducción a Modélica, laboratorio de sistemas dinámicos, facultad de ciencias exactas, ingeniería y agrimensura, universidad Nacional de Rosario. 3-10p.

KOMOTO, KONDOH, et al. Parameter-oriented Visualization of a Modelica Model with a Numerical Data Integration Feature *Procedia CIRP*, vol. 21, pp. 40–45, 2014.

LIU, QUAN, et al. A MEMS-based piezoelectric cantilever patterned with PZT thin film array for harvesting energy from low frequency vibrations, *Phys. Procedia*, vol. 19, pp. 129–133, 2011.

LORENTE. Un espectador del progreso científico: súper imanes, UNED ediciones, 2005.p 114-120.

MAYORES BHMAX, QUESADA. Difusión: El reto de los imanes permanentes, 2011, p.1–4.

MERINO. Energías renovables: energías renovables para todos, Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, 3p, 2005.

MINAZARA, VASIC, and COSTA. Piezoelectric generator harvesting bike vibrations energy to supply portable devices, Université de Cergy-Pontoise, No 6, marzo 2008.

MODÉLICA. A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling Language Specification Version 3.3 Revision 1, Modelica, julio 2014, pp. 71-85.

MODÉLICA. electrical analog ideal [en línea], [citado 04 en agosto de 2016]. Disponible en internet: <[http://www.maplesoft.com/documentation\\_center/online\\_manuals/modelica/Modelica\\_Electrical\\_Analog\\_Ideal.html](http://www.maplesoft.com/documentation_center/online_manuals/modelica/Modelica_Electrical_Analog_Ideal.html)>.

OPENMODELICA. OpenModelica Connection editor [en línea], [citado 04 en agosto de 2016]. Disponible en internet: <<https://openmodelica.org/?id=78:omconnectioneditoromedit&catid=10:main-category>>.

MURILLO, CASTRO. Construcción de una maqueta: didáctica de un sistema posicionador de órdenes para un buque, Facultad de ciencias, 2006.p1-81.

NENNINGER, ULRICH. Tiempo de recolección, La captación de energía para la creación de dispositivos realmente autónomos en procesos industriales. ABB, pag 47. 2011

PERPETUM. PMG Perpetum [en línea], 2013, [citado 03 en julio de 2016]. Disponible en internet: <<https://perpetuum.com/download/>>.

PERROTTA Michael. Thing power – Bolt power cells energizes “internet of things” applications [en línea], 2013, [citado 4 en julio de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.prweb.com/releases/2013/11/prweb11344903.htm>>.

PRINCIPALES OPERACIONES. En la Metalurgia De Polvos, Diferentes Aspectos de La Metalurgia de Los Polvos,2009, p.1–7.

PRIYA, INMAN. Energy Harvesting Technologies, Blacksburg.: Springer, 2009, 20p - 133 p. ISBN 978-0-387-76463-4.

RAHMAN and HOQUE. Prospects of Harvesting Energy from Vibration in Bangladesh, vol. 90, pp. 166–171, 2014.

RODRIGUEZ, IZQUIERDO, et al. Energías renovables y eficiencia energética.: instituto tecnológico de Canarias S.A,2008, ISBN 978-84-69093-86-3

SANDOVAL, CNN. La planta solar más grande de Latinoamérica está en honduras [en línea], mayo 2015, [citado 18 en junio de 2015]. Disponible en internet: <<http://cnnespanol.cnn.com/2015/05/18/la-planta-solar-mas-grande-de-latinoamerica-esta-en-honduras/>>.

SOFTUSVISTA, aluminio propiedades magnéticas, [en línea], [citado 01 en marzo en 2016]. Disponible en internet: <<http://www.comparisonofmetals.com/es/aluminio-propiedades-magneticas/model-17-6>>.

SOLBES, and TARÍN. Algunas dificultades en torno a la conservación de la energía. In *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 16, pp. 387-397, 1998.

SPREEMAN, MANOLI. Electromagnetic vibration energy harvesting devices: Springer,2012,10 p. ISBN 978-94-007-2943-8

SRUJANA, MATHEWS, and HARIGOVINDAN. Multi-source Energy Harvesting System for Underwater Wireless Sensor Networks, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 46, pp. 1041–1048, 2015.

TILLER. Modelica by example [en línea], [citado en 10 febrero de 2015]. Disponible en internet: <[http://book.xogeny.com/components/components/elec\\_comps/](http://book.xogeny.com/components/components/elec_comps/)>.

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA, DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA. Introducción a la modelización con Bond Graphs, pp. 2-10, 2000.

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID. Introducción a la técnica de Bond-Graph, Capítulo 1, pp. 2-11, 2009.

UNIVERSITY OF CALIFORNIA. Open source library for building energy and control systems [en línea], [citado 04 en julio de 2016]. Disponible en internet: <<http://simulationresearch.lbl.gov/modelica/>>.

URGENTE 24. Quien mueve us7600 millones al año en Latinoamérica [en línea], 2016, [citado en 08 en diciembre de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.urgente24.com/251384-quien-mueve-us-7600-millones-al-ano-en-latinoamerica-2016>>.

VERA. Introducción a la técnica de bond graph en la dinámica ferroviaria, INSIA, pp. 291- 298, 1998.

VIFISICA. Tablas de valores de los coeficientes, 2013 [en línea], 2013, [citado 15 en diciembre de 2016]. Disponible en internet: <<https://vallyblog.wordpress.com/fisica-2013/2-periodo/friccion/coeficiente-de-friccion/tablas-de-valores-de-los-coeficientes/>>.

VIJAYAN, FRISWELL, et al. Non-linear energy harvesting from coupled impacting beams, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 96–97, pp. 101–109, junio, 2015.

WWF. Líderes en energía limpia Países top en energía renovable en Latinoamérica, Países Top en Energía Renovable en Latinoamérica, p. 7, 2014.

XIE, HUANG, et al. Feasibility of an Electrostatic Energy Harvesting Device for CFCs Aircraft, vol. 99, pp. 1213–1222, 2015.

ZAVERSKY, RODRÍGUEZ- GARCÍA, et al. Transient Behavior of an Active Indirect Two-tank Thermal Energy Storage System During Changes in Operating Mode – An Application of an Experimentally Validated Numerical Model *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 1078–1087, 2014.

Technical drawing showing the orthographic and isometric views of a rectangular prism with a square base and a height of 100 units. The base dimensions are 100 units by 100 units. The drawing includes the following views:

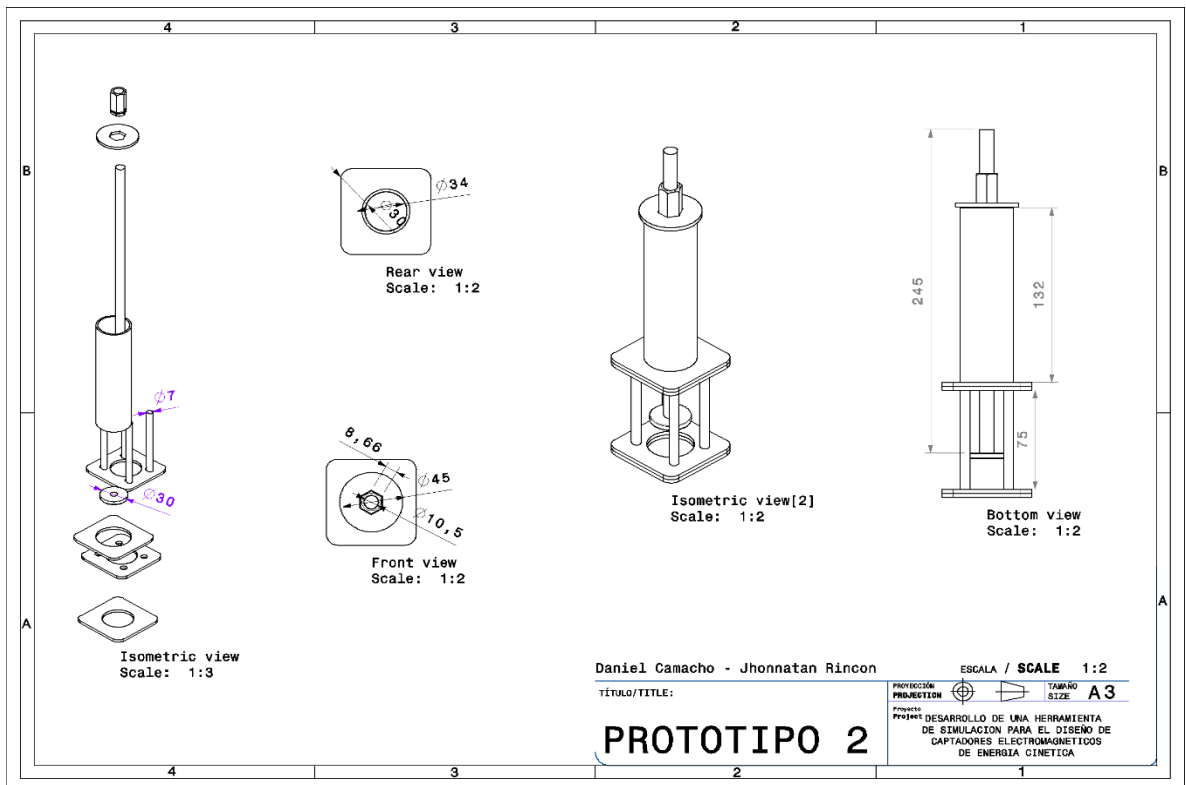
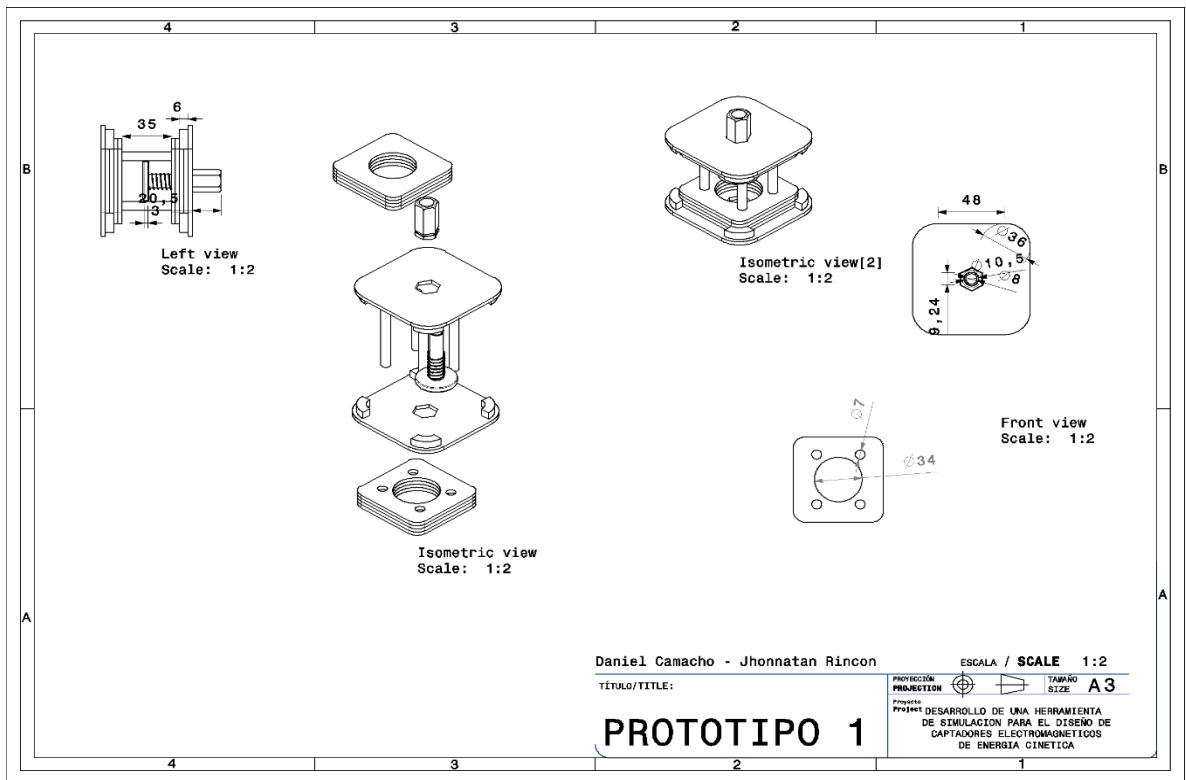
- Front view:** Scale: 1:2. Shows a square with side length 100 units.
- Top view:** Scale: 1:2. Shows a square with side length 100 units.
- Left view:** Scale: 1:2. Shows a rectangle with height 100 units and width 10 units.
- Rear view:** Scale: 1:2. Shows a square with side length 100 units.
- Isometric view:** Scale: 1:4. Shows the 3D representation of the object.

The drawing is labeled "DISEÑO 1" and includes a title block with the following information:

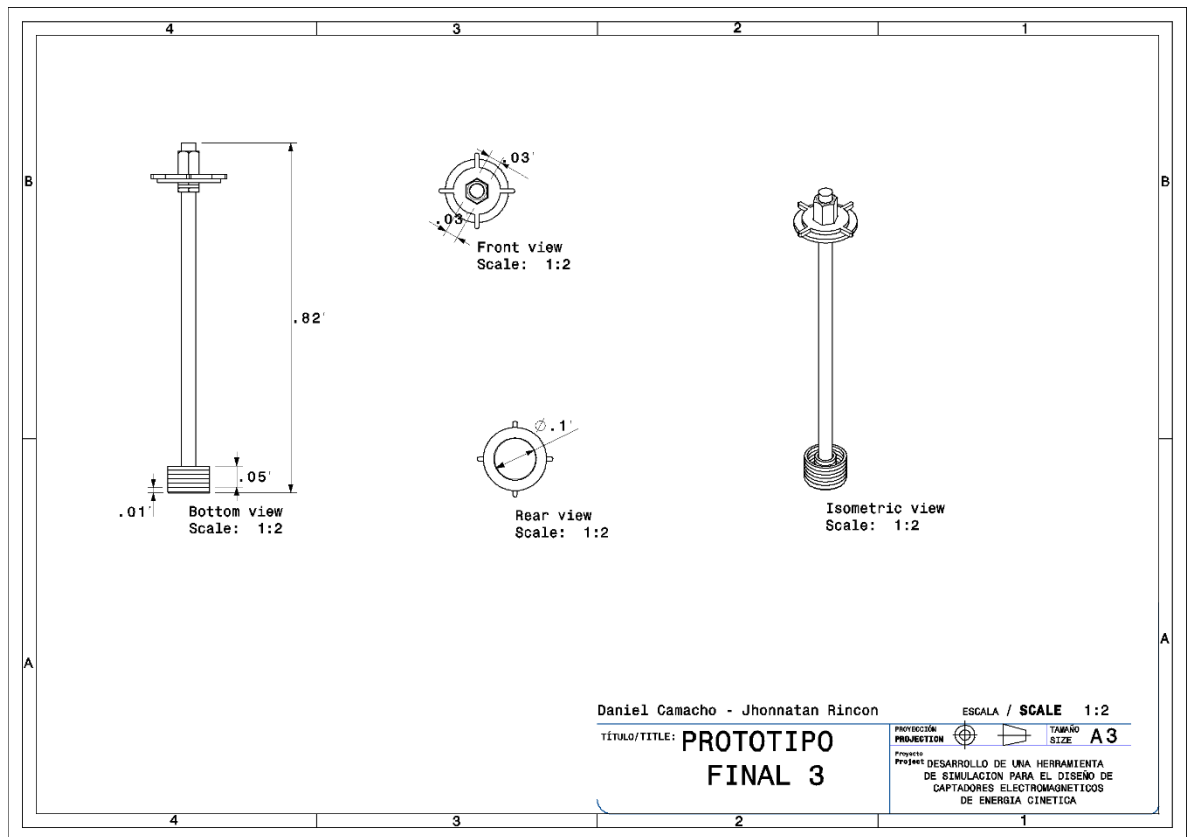
- Author: Daniel Camacho - Jhonnatan Rincon
- Project: DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACION PARA EL DISEÑO DE CAPTADORES ELECTROMAGNETICOS DE ENERGIA CINETICA
- Scale: 1:2
- Sheet: 1











## ANEXO B. PLANOS ELÉCTRICOS

